



Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA EN LA
ZONA CENTRAL Y PARACENTRAL DE EL
SALVADOR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL
P R E S E N T A

BETSI MARIELA LEMUS CÁRCAMO

DIRECTOR DE TESIS: **DR. HUGÓN JUÁREZ GARCÍA**

MÉXICO, D. F.

JULIO DE 2014

Agradecimientos y Reconocimientos

Agradezco primeramente a Dios Todopoderoso de haberme permitido iniciar con gran emoción y entusiasmo una carrera de Maestría y haber podido concluirla con satisfacción y orgullo.

A mi familia. Mi papi, Oscar, mi abuelita, Emma, mi mami, Ana, mis hermanos Susy, Paty, Amalia, Ramón y Oscar que todos de diferente forma me dieron su apoyo, su ayuda y siempre estuvieron conmigo dándome fuerzas para seguir adelante sin bajar los brazos.

A mi novio. Napo, que nunca me faltó su amor y comprensión en periodos de estrés, en las largas noches de estudio; su aliento cuando las fuerzas flaquearon y su grata compañía en los momentos de alegría en cada paso dado en todo este tiempo.

A mi tutor, Dr. Hugón Juárez García que con su dedicación tuvo el tiempo y disponibilidad para enseñarme y guiarme en la elaboración del trabajo de tesis.

A mis sinodales: Dr. Luciano Fernández y Dr. Andrés Gama por su tiempo dedicado a la revisión de este documento.

Agradezco al CONACYT que me otorgó la beca para poder realizar mis estudios de maestría.

A la UAM-AZCAPOTZALCO, el Posgrado de Ingeniería Estructural y todos sus profesores, por haberme acogido, enseñado y ser un ejemplo inspirador a seguir.

A mis compañeros, con quienes viví una estadía en México agradable y con los cuales caminé el sendero del aprendizaje y especialización.

Gracias a la vida que me ha dado tanto...
Y en las multitudes al hombre que yo amo!

– Violeta Parra –

A ti, Napoleón Rodríguez que amo con todo mi corazón.

Índice

SIGLAS.....	i
Capítulo 1 Introducción.....	i
1.1. Objetivos	5
1.2. Justificación	7
1.3. Limitaciones	8
1.4. Alcances	8
Capítulo 2 Generalidades	X
2.1. Sismicidad en El Salvador	12
2.2. Población de El Salvador	19
2.3. Vivienda en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	25
2.4. Evolución de los materiales de construcción El Salvador	28
Capítulo 3 Métodos de evaluación de Vulnerabilidad Sísmica	31
3.1. Teoría de vulnerabilidad sísmica	33
3.2. Sistemas de evaluación de vulnerabilidad	35
3.3. Vulnerabilidad Calculada	37
3.4. Vulnerabilidad Observada.....	37
3.4.1. Métodos basados en la evaluación de la capacidad.....	38
a. Método del índice de vulnerabilidad	38
b. Métodos Japoneses	39
c. Métodos a partir de la opinión de expertos	39
d. FEMA.....	40
e. Método ATC.....	42
f. Método HazUS	43
g. Escala Macrosísmica Europea (EMS)	44
3.4.2. Métodos que predicen el daño.....	46

a. Curvas de fragilidad	47
Métodos basados en observaciones de campo.....	48
Métodos analíticos	50
Métodos experimentales.....	51
b. Matrices de probabilidad de daño (MPD).....	52
3.5. Estudios de vulnerabilidad sísmica en El Salvador.....	55
 Capítulo 4 Matrices de Probabilidad de Daños para la Zona Central y Paracentral de El Salvador	 58
4.1. Reglamentación de El Salvador	59
4.1.1. Norma técnica de diseño y construcción de viviendas.....	64
4.1.2. Folleto complementario Adobe	67
4.2. Tipologías estructurales de la vivienda común.....	69
4.2.1. Materiales de construcción utilizados en la vivienda común por departamento	73
a. Chalatenango	73
b. La Libertad	75
c. San Salvador.....	77
d. La Paz	79
e. Cuscatlán.....	81
f. Cabañas.....	82
g. San Vicente	84
4.3. Caracterización de la vivienda común en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	85
4.4. Vulnerabilidad sísmica por materiales de construcción.....	89
4.4.1. Vulnerabilidad alta, media y baja en los municipios de la Zona Central y Paracentral de El Salvador.	100
4.5. Matrices de Probabilidad de Daño para la Zona Central y Paracentral de El Salvador	102
4.5.1. Mampostería	103
4.5.2. Adobe	117
4.5.3. Bahareque	125

4.5.4. Madera, Cartón, Desechos y demás materiales utilizados en la construcción de viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	126
Capítulo 5 Vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador.....	128
5.1. Escenarios sísmicos.....	130
5.2. Resultados.....	133
Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones	144
6.1. Conclusiones.....	145
6.2. Recomendaciones y Trabajos futuros	148
Bibliografía.....	149
Anexos.....	155
Escalas de intensidad.....	156
Escala Rossi – Forel	157
Escala Medvédev-Sponheuer-Kárník	158
Escala Mercalli Modificada de Intensidad	160
Escala sísmica de Geofian	162
Estadísticas de Vivienda en El Salvador	164
Clasificación de los poblados	171
Conversión de Aceleración Pico del Terreno a Escala de Mercalli Modificada	175
 Índice de Figuras	
Figura 1-1 División política de El Salvador.	1
Figura 1-2 Localización geográfica de El Salvador. Fuente: Google Maps.	2
Figura 1-3 División Política de El Salvador.	3
Figura 2-1 División política de El Salvador.	11
Figura 2-2 Estadísticas de población 1950 – 2050. Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.	12

Figura 2-3 Erupción de 2005, Volcán Ilimatepec. Fuente: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Resultados del proyecto IPGH 2.1.4.2.60.	13
Figura 2-4 Proceso de Subducción de la Placa de Cocos y del Caribe. Fuente: SNET.	14
Figura 2-5 Centro cuaternario que rodea la ciudad de San Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth.	15
Figura 2-6 Mapa Tectónico de placas para la región Centroamericana. Fuente: Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología.	16
Figura 2-7 Epicentros de los sismos de 13 de Enero y 13 de Febrero de 2001. Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.	17
Figura 2-8 Mapa tectónico de Centroamérica. Fuente: Centro para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central.	18
Figura 2-9 Incremento de población 1900 – 2010. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.	21
Figura 2-10 Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. Fuente: Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador.	21
Figura 2-11 Población de El Salvador agrupada en zonas, según el Censo de Población y Vivienda 2007. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	22
Figura 2-12 Población en la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	23
Figura 2-13 Deslizamiento de Las Colinas, terremoto 13 de enero de 2001. Fuente: La Prensa Gráfica.	25
Figura 2-14 Comportamiento de la tenencia de vivienda en El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	26
Figura 2-15 Comportamiento de la tenencia de vivienda en la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	27
Figura 2-16 Vivienda en área urbana y rural en Chalatenango. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	28

Figura 3-1 Métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica.....	36
Figura 3-2 Clasificación del daño en estructuras de mampostería. Fuente: Vulnerabilidad sísmica en Chilpancingo y colonia Roma, Eduardo Arellano Méndez.	46
Figura 3-3 Cálculo del Factor de Daño Medio.....	54
Figura 3-4 Curva de Factor de Daño Medio para mampostería en California, Estados Unidos.	55
Figura 4-1 Zonificación sísmica de El Salvador.....	60
Figura 4-2 Tipos de estructuras según la Norma Especial, de acuerdo al tipo de sistema de piso y techo	65
Figura 4-3 Tipología de paredes de acuerdo a la Norma especial para diseño y construcción de viviendas.....	65
Figura 4-4 Materiales de construcción utilizados en El Salvador.....	70
Figura 4-5 Construcción de bloque de concreto reforzado, El Salvador.....	71
Figura 4-6 Construcción de las viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	73
Figura 4-7 Viviendas en Chalatenango.....	75
Figura 4-10 Viviendas en La Paz	80
Figura 4-11 Viviendas en Cuscatlán	81
Figura 4-12 Viviendas en Cabañas	83
Figura 4-13 Vivenda en San Vicente	85
Figura 4-14 Registros de aceleración, velocidad y desplazamiento debido al sismo de 2001.	90
Figura 4-15 Vulnerabilidad sísmica con respecto a los materiales de construcción en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	92
Figura 4-16 Departamento de Chalatenango	93
Figura 4-17 Departamento de Cabañas.	93
Figura 4-19 Departamento de La Libertad.....	96
Figura 4-20 Departamento de La Paz.....	97
Figura 4-21 Departamento de San Vicente.....	98
Figura 4-22 Departamento de Cuscatlán	99
Figura 4-23 Materiales de construcción en el municipio San Luis del Carmen, Chalatenango	100
Figura 4-24 Materiales de construcción en el municipio de Mejicanos	101
Figura 4-25 Materiales de construcción en el municipio promedio	102
Figura 4-26 Planta general de vivienda de mampostería El Salvador	104

Figura 4-27 Cimentaciones mínimas de acuerdo a la Norma Especial para diseño y construcción de viviendas	105
Figura 4-28 Sección transversal de muro de mampostería reforzada.....	106
Figura 4-29 Corte en eje 2-2 de vivienda típica	106
Figura 4-30 Planta de refuerzo de paredes de acuerdo a la Norma Especial para diseño y construcción de viviendas.....	107
Figura 4-31 Planta de techos de vivienda típica	108
Figura 4-32 Subdivisión de la mampostería en la Zona Central y Paracentral de El Salvador	112
Figura 4-34 Curvas de FDM para mampostería de baja altura	117
Figura 4-35 Planta de vivienda tipo de Adobe en El Salvador	119
Figura 4-36 Planta de cimentación de vivienda de Adobe.....	120
Figura 4-37 Sección transversal de pared y cimentación de vivienda de Adobe.....	121
Figura 4-38 Planta de techo de vivienda de Adobe	121
Figura 4-39 Curvas de fragilidad utilizadas para Costa Rica.....	122
Figura 4-40 Curva de fragilidad para Adobe, Nicaragua	123
Figura 4-41 Curva de fragilidad para construcciones de Adobe en la Zona Central y Paracentral de El Salvador.....	124
Figura 4-43 Vivienda de madera, El Salvador. Fuente: Wordpress. Cita de internet, JorgeAvaloswordpress	127
Figura 5-1 Curvas de fragilidad para la mampostería de baja altura de acuerdo al tipo de construcción.....	132
Figura 5-2 Curva de fragilidad para Adobe y Bahareque	133
Figura 5-3 Vulnerabilidad sísmica de la mampostería en la Zona Central y Paracentral de El Salvador.....	135
Figura 5-4 Mapa de Vulnerabilidad sísmica del Adobe en la Zona Central y Paracentral de El Salvador.....	141
Figura 5-5 Mapa de vulnerabilidad sísmica de mampostería de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, escenario 2	143

Índice de Tablas

Tabla 2-1 Volcanes con erupciones conocidas. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.	15
Tabla 2-2 Registro histórico de los principales eventos sísmicos en El Salvador. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales	19
Tabla 2-3 Estadísticas demográficas de la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.	20
Tabla 2-4 Distribución de la vivienda en la Zona de Estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.	27
Tabla 2-5 Estadísticas de vivienda censadas por DIGESTyC. Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.	29
Tabla 3-1 Algunos sismos importantes del siglo XX.	33
Tabla 3-2 Clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad. EMS - 98 (Grüntal, 1998)	45
Tabla 3-3 Matriz de Probabilidad de Daño para mampostería de baja altura. Fuente: ATC-13, MPD basada en la opinión de Expertos	53
Tabla 4-1 Coeficientes de sitio de El Salvador	61
Tabla 4-2 Factores de importancia	61
Tabla 4-3 Categorías de ocupación	62
Tabla 4-4 Altura máxima de viviendas	64
Tabla 4-5 Factor sísmico para viviendas de acuerdo al sistema de piso y techo	66
Tabla 4-6 Método de análisis dependiendo de la estructuración de la vivienda	66
Tabla 4-7 Coeficientes sísmicos para el adobe	68
Tabla 4-8 Inventario de viviendas en El Salvador	72
Tabla 4-9 Vivienda en Chalatenango	74
Tabla 4-10 Viviendas en La Libertad	76
Tabla 4-11 Viviendas en el departamento de San Salvador	78
Tabla 4-12 Viviendas en el departamento de La Paz	80
Tabla 4-13 Viviendas en el departamento de Cuscatlán	82
Tabla 4-14 Viviendas en el departamento de Cabañas	83
Tabla 4-15 Vivienda en el departamento de San Vicente	84

Tabla 4-16 Daños en las viviendas por el sismo de 2001, Fuente: Adaptación de CEPAL, sobre la base suministrada por el Comité de Emergencias Nacionales (COEN) y la Encuesta de Hogares de Propósito Múltiple para el año 1999 de DIGESTYC.....	87
Tabla 4-17 Escala de vulnerabilidad sísmica adoptada basada en los materiales de construcción.	90
Tabla 4-18 Intervalo de porcentajes de viviendas vulnerables por departamento	91
Tabla 4-19 Comprobación de criterio de plantas alargadas en las viviendas	109
Tabla 4-20 Matriz de Probabilidad de Daños para mampostería de baja altura, ATC-13.....	110
Tabla 4-22 Matrices de probabilidad propuesta para El Salvador para mampostería reforzada de baja altura	112
Tabla 4-23 MPD propuesta para viviendas de mampostería reforzada, Construcción formal.....	114
Tabla 4-24 MPD propuesta para viviendas de mampostería confinada, Construcción formal	114
Tabla 4-25 MPD propuesta para viviendas de mampostería reforzada, Construcción informal....	115
Tabla 4-26 MPD propuesta para viviendas de mampostería confinada, Construcción Informal ...	116
Tabla 5-1 Clasificación de los poblados de acuerdo al número de habitantes	129
Tabla 5-2 Escenarios sísmicos utilizados	131
Tabla 5-4 Viviendas dañadas en San Vicente	134
Tabla 5-5 Viviendas dañadas en Chalatenango.....	136
Tabla 5-6 Viviendas dañadas en Cuscatlán	137
Tabla 5-7 Viviendas dañadas en La Libertad	137
Tabla 5-8 Viviendas dañadas en La Paz	138
Tabla 5-9 Viviendas Dañadas en San Salvador	139
Tabla 5-10 Viviendas dañadas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador ante un sismo con un rango de intensidades [XII - V]	140

AMSS = Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador.

DIGESTyC = Dirección General de Estadísticas y Censos, El Salvador.

FEMA = Federal Emergency Management Agency

HazUS = Hazard United States.

MPD = Matrices de Probabilidad de Daños.

MARN = Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador.

MSPAS = Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, El Salvador.

SIG = Sistema de Información Geográfica, también conocido como GIS.

SNET = Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador.

UNAM = Universidad Nacional Autónoma de México.

UNDRO = United Nations Disaster Relief Coordinator.

UNESCO = United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

La República de El Salvador se encuentra ubicada geográficamente al suroeste de América Central y sobre el litoral del océano Pacífico; al Norte y al Este limita con Honduras, al Oeste con Guatemala, y al Sur con el océano Pacífico, Figura 1-2.

Es el país de menor extensión territorial en la región centroamericana, sin embargo es el más densamente poblado. Por su ubicación, está sujeto a muchos fenómenos naturales como tormentas tropicales e inundaciones, además el embate de recurrentes sismos debido a la interacción de varios factores propios del territorio y actividad volcánica.

El Salvador se divide políticamente en 14 departamentos (división política equivalente a los estados en México), Figura 1-1, agrupados en cuatro zonas que comprenden:

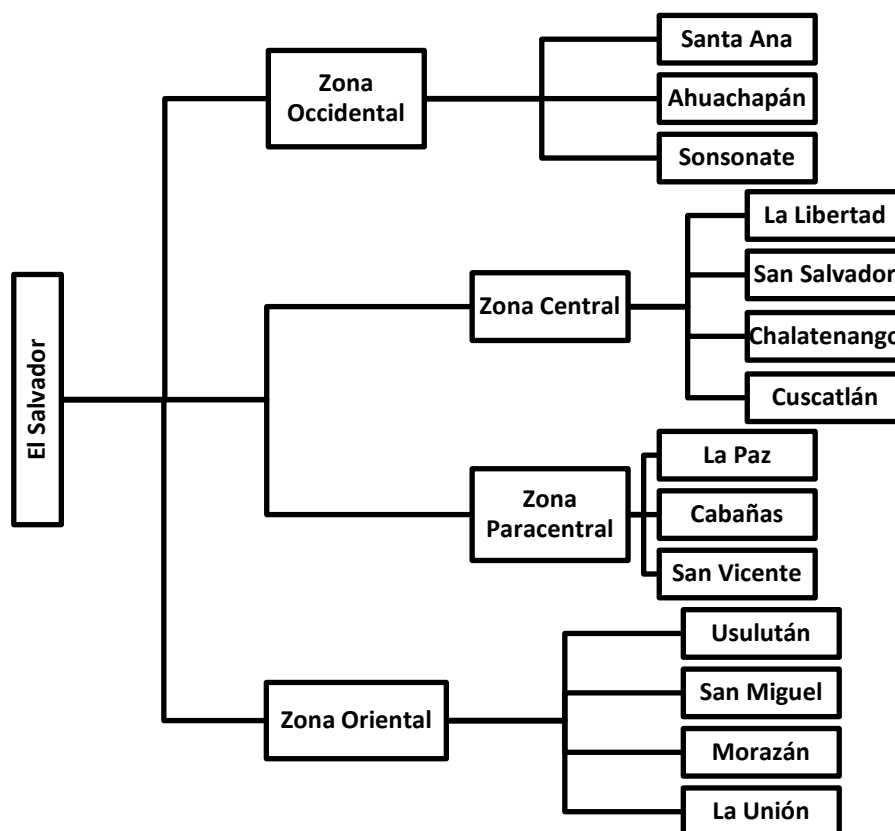


Figura 1-1 División política de El Salvador.

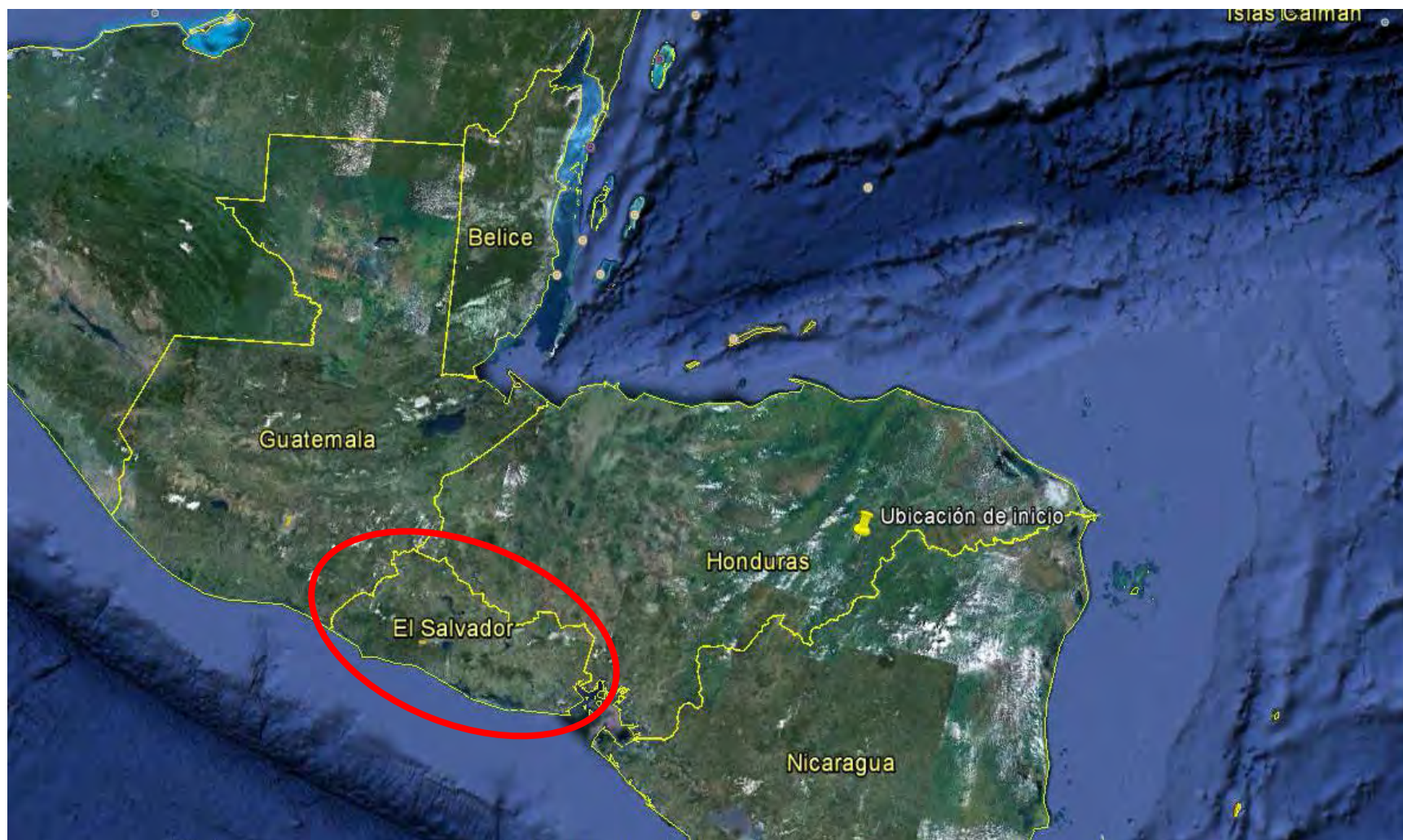


Figura 1-2 Localización geográfica de El Salvador. Fuente: Google Maps.



Figura 1-3 División Política de El Salvador.

En este trabajo se estudiará la vulnerabilidad sísmica de la zona Central y Paracentral de El Salvador, donde se incluirá las áreas rurales y urbanas de 7 de los 14 departamentos que constituyen el país, Figura 1-3.

La interrogante que surge al tener un conocimiento general del entorno que influye a El Salvador es ¿Cuál es la vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador?. Con base en esta pregunta, la hipótesis a plantearse es:

La Zona Central y Paracentral de El Salvador tiene un alto grado de vulnerabilidad ante sismos que generan intensidades a partir de VII en escala de intensidad de Mercalli Modificada principalmente en las zonas más pobres de la región, por ejemplo las zonas rurales.

Para la comprobación de la hipótesis planteada, se inicia la investigación con la definición de los parámetros, lineamientos, finalidades y limitaciones de la zona a estudiar.

En el capítulo II, se detalla los datos sociales de El Salvador, la población, la estadística de las viviendas existentes en el país así como también los materiales de construcción utilizados. Además, se incluye un estudio de la sismicidad de la región donde se explican los motivos por los cuales El Salvador es altamente sísmico. De igual manera, se aborda la historia de los sismos más importantes que han ocurrido en país y han afectado las zonas a estudiar.

En el capítulo III, se aborda el estado del arte donde se explica los conceptos básicos de la vulnerabilidad sísmica, la diferencia que existe con el riesgo y peligro sísmico. Además, se plantea algunos de los métodos existentes más destacados en la actualidad para realizar un estudio de vulnerabilidad sísmica tanto de una estructura especial como para un conglomerado.

El capítulo IV, describe el método utilizado para realizar el estudio de vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, se detalla paso a

paso el desarrollo de la investigación incluyendo gráficos, tablas y ecuaciones utilizadas en el proceso.

Para concluir, el capítulo V, muestra y explica los resultados obtenidos a partir de la investigación realizada donde se incluye los datos sociales, las historias sísmicas de El Salvador, los materiales de construcción que se utilizan en la zona Central y Paracentral, y demás aspectos que influyen en la vulnerabilidad sísmica.

El capítulo VI está dedicado a exponer las conclusiones y recomendaciones que se obtienen a partir de la investigación realizada basadas en los cálculos y los resultados obtenidos, donde además se presenta un resumen de la investigación. Para concluir el documento con anexos donde se muestran fotografías, tablas, estadísticas que hacen referencia a los datos utilizados en el desarrollo del trabajo.

1.1. Objetivos

Los sismos son eventos naturales, producidos por la liberación de energía acumulada debida a los esfuerzos existentes que provocan la ruptura del terreno. Hasta ahora, no es posible predecir el momento y el lugar exactos de su ocurrencia por medio de un método científico, sin embargo, se tienen datos de las regiones que están más expuestas a que sucedan por lo que es la responsabilidad de los territorios con mayor riesgo preparar aspectos importantes como son la infraestructura y la educación social para soportar los sismos.

Si se aborda la problemática desde un aspecto físico, los países deben contar con la reglamentación idónea para proporcionar a las construcciones el adecuado nivel de desempeño para responder aceptablemente ante un sismo con lo que se garantiza salvaguardar las vidas de la población, minimizar las pérdidas y daños que afectan a la economía.

Es conveniente la estimación de la vulnerabilidad en El Salvador, país que durante su historia ha sufrido las consecuencias de los sismos, con el fin de conocer su realidad y estar preparado para soportarlos, particularmente, las Zonas Central y Paracentral que han sido las más afectadas por estos fenómenos de la naturaleza.

Objetivo General

- Determinar la vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, utilizando el método de Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daños.

Objetivos Específicos

- Identificar los sistemas y materiales utilizados en la construcción de viviendas más comunes en las zonas de estudio.
- Proponer tipologías estructurales que agrupen las viviendas existentes en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, de acuerdo a los materiales de construcción predominante en los muros.
- Estudiar los sismos más importantes ocurridos en la historia reciente de El Salvador y los daños provocados por éstos.
- Identificar las fuentes principales de sismos en El Salvador.
- Proponer curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daños para la Zona Central y Paracentral de El Salvador.
- Identificar los casos de mayor vulnerabilidad mediante escenarios sísmicos en la Zona Central y Paracentral de El Salvador con intensidades moderadas y grandes.
- Zonificar en el área de estudio la vulnerabilidad sísmica, a través de mapas de acuerdo a los escenarios sísmicos propuestos.

1.2. Justificación

El Salvador es un país en vías de desarrollo que ha sido afectado históricamente por desastres naturales, que afectan la economía nacional y dejan luto en miles de familias salvadoreñas. Estos problemas se producen por fenómenos naturales, como inundaciones ocasionadas por tormentas tropicales, erupciones volcánicas, sismos, etc.

Es importante el estudio de todos estos fenómenos naturales, las consecuencias que generan en las obras civiles y en los seres humanos; por ello, se desarrollará un estudio de la vulnerabilidad en el que se aborda el aspecto sísmico en las Zonas Central y Paracentral de El Salvador.

Por otro lado, la mayoría de los estudios de vulnerabilidad sísmica en El Salvador datan desde hace una década, periodo en el cual ocurrieron dos eventos sísmicos de importancia: el primero, el terremoto del 13 de enero de 2001 (subducción, $M=7.6$), (Comisión Económica para América Latina y El Caribe, Sede Subregional en México, 2001); este evento dejó un saldo de 944 fallecidos, 1,155 edificios públicos dañados, 108,261 viviendas destruidas, 19 hospitales dañados y 445 derrumbes. El segundo, el terremoto del 13 de febrero de 2001 (falla local, $M=6.6$), (Comisión Económica para América Latina y El Caribe, 2001). En el cual se reportaron 315 fallecidos; 82 edificios públicos dañados; 41,302 viviendas destruidas; 5 hospitales dañados; y 71 derrumbes, (Sistema Nacional de Estudios Territoriales).

Estos dos desastres dejaron una pérdida económica que se estima en más de mil millones de dólares, en concepto de pérdidas en exportaciones, daños materiales y ambientales (Mesa Permanente para la Gestión de Riesgo en El Salvador, 2011). En las Zonas Central y Paracentral se han localizado los mayores daños de estos sismos, por lo que el estudio se realizará en estas zonas críticas de El Salvador.

1.3. Limitaciones

La investigación se delimitará a la Zona Central y Paracentral de la República de El Salvador, que incluye los departamentos de: La Libertad, Chalatenango, La Paz, San Salvador, Usulután, San Vicente, Cabañas y Cuscatlán. En éstos se estudiará las zonas rurales y urbanas para proponer un nuevo estudio de vulnerabilidad abordado desde el enfoque del método de Matrices de Probabilidad de Daños y Curvas de Fragilidad.

Cabe mencionar que la investigación se basará en las estadísticas oficiales de población y vivienda obtenidas del Censo de Población realizado en 2007 por la Dirección General de Estadísticas y Censos, DIGESTyC en adelante; por lo cual no se cuenta con información detallada de estructuras de 3 o más niveles en las Zonas Central y Paracentral, tampoco se conoce esta información a nivel nacional. Hasta el momento que se realizó la investigación ninguna organización estatal o privada ha desarrollado un levantamiento de edificaciones existentes en el país.

Las curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño presentadas en el trabajo se propondrán basadas en la opinión de expertos que se fundará en los datos históricos de sismos en El Salvador, investigaciones realizadas en otros países que tengan un entorno sísmico semejante al existente en el país, además de estructuras y sistemas constructivos de similares condiciones.

1.4. Alcances

La investigación pretende encontrar los sistemas constructivos y los materiales más utilizados para la construcción de vivienda común en la Zona Central y Paracentral de El Salvador con la finalidad de establecer por medio de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño la vulnerabilidad sísmica.

Además, identificar el nivel del sismo máximo probable al que están expuestas las zonas de estudio; en este sentido cabe la aclaración que a pesar que esto supondría la definición del peligro sísmico de El Salvador la investigación no abordará dicho apartado. Se incluye un pequeño análisis de la Norma Especial para Diseño y Construcción de

Viviendas, y la Norma Técnica para Diseño por Sismo para tener criterios de calificación de las estructuras.

Con las intensidades máximas, los materiales de construcción, curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño, se podrá crear mapas de vulnerabilidad tomando en cuenta todos los factores de riesgo ante diferentes escenarios sísmicos para presentar las zonas más susceptibles y vulnerables del país.

Los mapas serán de utilidad para ubicar las zonas en las que en sismos futuros se darán la mayor cantidad de daños; siendo una herramienta para crear líneas vitales y programas de prevención de desastres.

La República de El Salvador se ubica geográficamente al Sudoeste de América Central y es el país más pequeño de extensión territorial de la región; al Norte y al Este, limita con Honduras, al Oeste con Guatemala y al Sur con el océano Pacífico.

El territorio incluye nueve islas en el golfo de Fonseca, la extensión territorial es de veintiún mil cuarenta y un kilómetros cuadrados (21,050 km²), y la división administrativa consiste en catorce departamentos, los cuales a su vez se dividen en municipios, (Ministerio de Turismo, 2013).

Estos departamentos se agrupan en: Zona Occidental (Ahuachapán, Santa Ana y Sonsonate), la Zona Oriental (Usulután, San Miguel, Morazán y La Unión), Zona Central (La Libertad, Chalatenango, Cuscatlán y San Salvador), y la Zona Paracentral (Cabañas, La Paz y San Vicente), Figura 2-1.



Figura 2-1 División política de El Salvador.

El Salvador tiene una población de 6.5 millones de habitantes de los cuales tres millones quinientos noventa y ocho mil ochocientos treinta y seis (3, 598,836) viven en zonas urbanas, que representa el 63% de la población y el resto vive en el área rural, (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2009), cuya proyección para los próximos años es una tendencia al alza, Figura 2-2 (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2009).

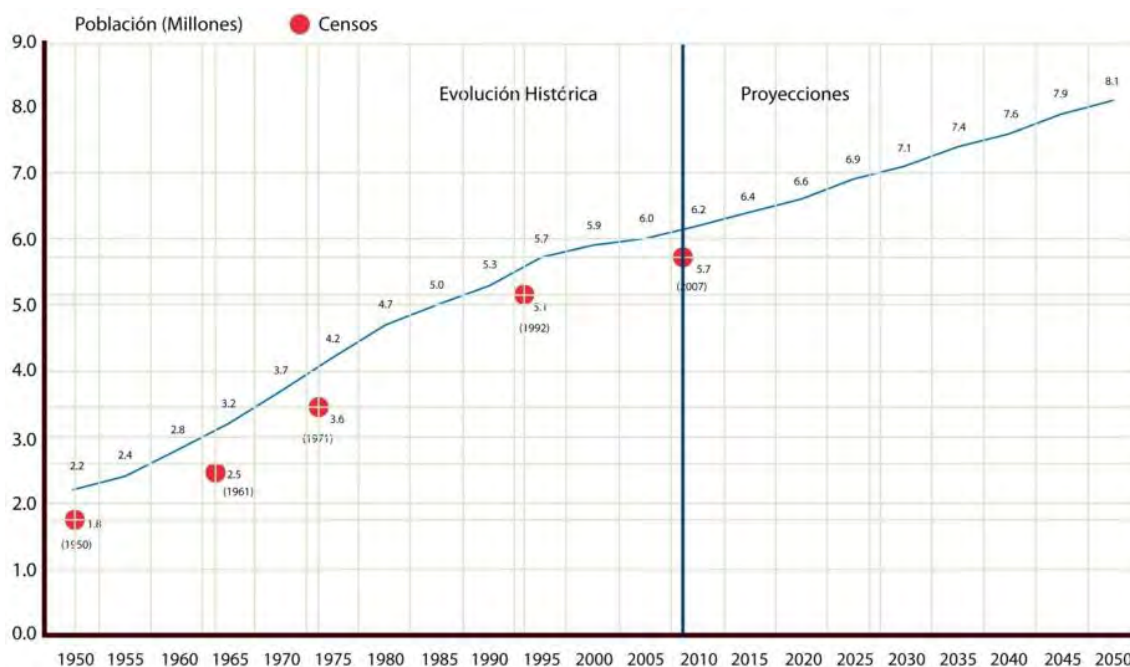


Figura 2-2 Estadísticas de población 1950 – 2050. Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.

2.1. Sismicidad en El Salvador

El Salvador se sitúa en una región altamente sísmica por su localización en el cinturón de fuego del Pacífico que genera actividad volcánica, produce fallas geológicas en el territorio y además el proceso de subducción de las placas tectónicas en el Pacífico.

La actividad volcánica del país generó que el suelo del territorio salvadoreño sea de origen volcánico hasta en un 90%, por lo cual se desarrolla la agricultura, caficultura, entre

otros pues este suelo se caracteriza por ser rico en nutrientes, buen receptor de reservas de agua, entre otras propiedades.

A lo largo de toda la historia de El Salvador, se han dado innumerables erupciones debido a la actividad de sus volcanes, (Servicio Nacional de Estudios Territoriales), la última ocurrida el 1 de octubre de 2005 del volcán Ilamatepec, Santa Ana, que provocó pérdidas económicas importantes ya que afectó una tercera parte de la cosecha de café de ese año, (Universidad Nacional Autónoma de México & Servicio Nacional de Estudios Territoriales , 2007-2008), Figura 2-3, además destruyó a su paso un caserío ubicado en las cercanías del Lago de Coatepeque.



Figura 2-3 Erupción de 2005, Volcán Ilamatepec. Fuente: Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Resultados del proyecto IPGH 2.1.4.2.60.

Estos volcanes son el producto del proceso de subducción donde la placa de Cocos se desliza bajo la placa del Caribe, fusionando la roca que se convierte en magma y se eleva hasta la superficie. Toda la cordillera volcánica de El Salvador es paralela a la costa en donde se encuentra la zona de subducción y producto de este proceso, Figura 2-4.



Figura 2-4 Proceso de Subducción de la Placa de Cocos y del Caribe. Fuente: SNET.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, nombrado MARN en adelante, se determinó que existen veintitrés volcanes activos individuales y cinco campos volcánicos que agrupan estructuras volcánicas y lagos cratéricos; entre los que están: el volcán de San Miguel, Izalco; volcán de Santa Ana (Ilamatepec); el volcán de San Salvador (Boquerón), entre otros, Tabla 2-1.

La mayoría de ciudades principales de El Salvador se hayan asentadas en la periferia de volcanes activos, para ejemplificar un caso, el Área Metropolitana de San Salvador, AMSS en lo sucesivo, que alberga a la ciudad capital de la República salvadoreña, se encuentra ubicada entre dos centros volcánicos cuaternarios al borde Norte de la Cordillera del Bálsamo. En el Este de la ciudad, se encuentra la laguna cratérica de Ilopango que constituye una de las calderas más grandes de Centroamérica. En el Oeste está limitada por el complejo volcánico de San Salvador, con su cráter actual El Boquerón, Figura 2-5.

Tabla 2-1 Volcanes con erupciones conocidas. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

No.	Nombre	Altura msnm	Tipo volcán	Tipo de roca predominante	Localización	Última erupción
1	Santa Ana	2,382	Estrato volcán	Basalto de olivino y piroxeno	Santa Ana	2005
2	San Miguel	2,130	Estrato volcán	Basalto de olivino y augita	San Miguel	1976
3	Izalco	1,965	Estrato volcán	Basalto de olivino y augita	Sonsonate	1966
4	San Salvador	1,867	Estrato volcán	Basalto y andesita	San Salvador	1917
5	Conchaguita	550	Estrato volcán	Basalto	Isla del Golfo de Fonseca	1892
6	Islas Quemadas	450	Domo de lava	Dacita y Hornblenda	San Salvador	1879-1880
	Volcán Ilopango	438	Caldera	Dacita, pómez	San Salvador	429 d.C.
7	San Marcelino	1,480	Cono de escorias	Basalto de olivino y augita	Sonsonate	1722
8	El Playón	660	Cono de escorias	Basalto de olivino y augita	Sonsonate	1722



Figura 2-5 Centro cuaternario que rodea la ciudad de San Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth.

La litología de la zona está representada casi exclusivamente por rocas volcánicas y de sus productos re TRABAJADOS. Debido a la situación geotectónica, la región está altamente amenazada por erupciones volcánicas y por terremotos con sus efectos subsecuentes (Comisión Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres).

El régimen tectónico de Centroamérica y del Caribe, es el resultado de la interacción de cinco placas, la del Pacífico, la de Norteamérica, la de Cocos, la de Nazca y la de Sudamérica (Hurtado, 2000).

Sin embargo, en El Salvador la causa principal de sismos es la actividad de la zona de subducción entre las placas tectónicas de Cocos y del Caribe, que se encuentra a 125 km de la costa, en donde la placa de Cocos empieza a sumergirse por debajo de la placa del Caribe alcanzando hasta 300 Km por debajo de Centroamérica, Figura 2-6.



Figura 2-6 Mapa Tectónico de placas para la región Centroamericana. Fuente: Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología.

Existen dos tipos de sismos a los cuales se hace referencia en este documento: sismos regionales y sismos locales. A los sismos provocados por subducción de las placas tectónicas, las fallas geológicas de Guatemala y Honduras, se les llama **sismos regionales**;

por ejemplo, el último sismo importante de este tipo, fue el 13 de enero de 2001; ubicado en el Océano Pacífico, Figura 2-7, en donde el color azul representa el epicentro del sismo del 13 de enero, fuente: National Earthquake Information Center (NEIC). Y el color verde y rojo, simbolizan los epicentros del sismo del 13 de febrero proporcionados por estaciones sísmicas ubicadas en Estados Unidos y Centroamérica, respectivamente.



Figura 2-7 Epicentros de los sismos de 13 de Enero y 13 de Febrero de 2001. Fuente: Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales.

Además de la zona de subducción, el territorio salvadoreño está influido por el sistema de fallas geológicas de Guatemala, que definen la frontera entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe, éste es un sistema de fallas geológicas con dirección Norte-Sur que se ubica en la depresión de Honduras, Figura 2-8.

Los **sismos locales**, son los generados por la actividad volcánica y por la falla geológica en dirección Noroeste-Sureste que atraviesa el departamento de San Salvador, éstos ocurren a profundidades menores a 30 kilómetros y hasta la fecha son los que han causado la mayor destrucción en el territorio salvadoreño.

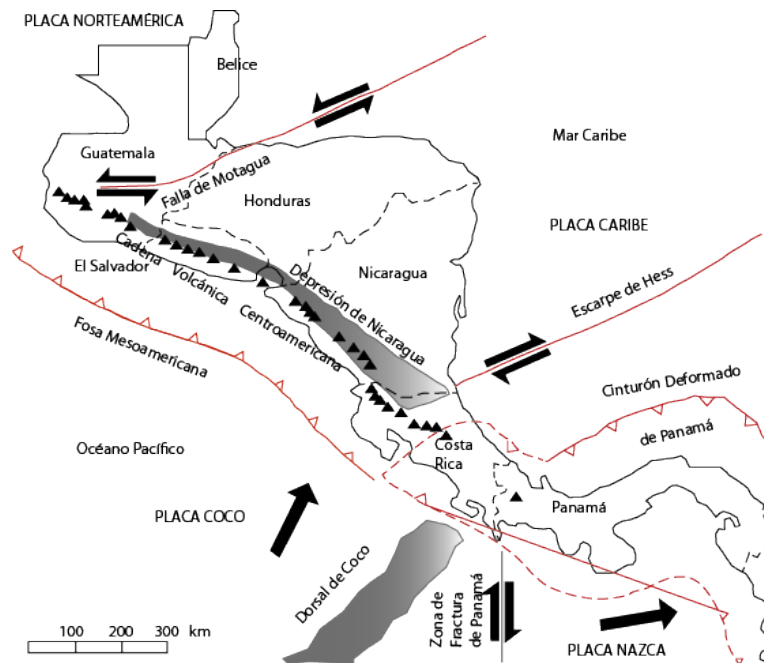


Figura 2-8 Mapa tectónico de Centroamérica. Fuente: Centro para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central.

Entre los sismos que históricamente han sido importantes y que cuya fuente ha sido una falla local está, Tabla 2-2:

- el sismo de Jucuapa – Chinameca, el 6 de mayo de 1951 ($M = 5.9 - 6.0$) ;
- San Salvador, el 3 de mayo de 1965 ($M = 6.3$);
- San Salvador, 10 de octubre de 1986 ($M = 5.7$)
- San Vicente, 13 de febrero de 2001 ($M = 6.6$). (Huezo, 2004).

Tabla 2-2 Registro histórico de los principales eventos sísmicos en El Salvador. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales

No.	Fecha	Hora local	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Prof. (km)	Magnitud	Tipo de falla	Fallecidos
1	10/10/1986	11:49	13.667	-89.190	8.0	5.7 Mw	Intraplaca	1,500 (AMSS)
2	07/6/1917	18:55	13.700	-89.500	--	6.5 Ms	Volcánico	1,050 (AMSS)
3	13/01/2001	11:35	13.049	-88.660	60.0	7.7 Mw	Intraplaca	944
4	06/05/1951	17:08	13.049	-88.660	10.0	6.2 Ms	Sin datos	400 (Jucuapa)
5	13/02/2001	8:22	13.621	-88.856	9.8	6.6 Mw	Intraplaca	315 (Zona Paracentral)
6	19/12/1936	20:43	13.720	-88.930	10.0	6.1 Ms	Sin dato	200 (Zona Paracentral)
7	03/05/1965	4:01	13.700	-89.170	15.0	6.0 Ms	Sin dato	125 (AMSS)
8	28/04/1919	00:45	13.670	-89.170	--	6.0 Ms	Sin dato	100 (AMSS)
9	19/06/1982	00:21	13.300	-89.400	80.0	7.3 Ms	Sin dato	8
10	06/09/1915	19:20	13.900	-89.600	60.0	7.7 Ms	Sin dato	5

Donde: Mw = Magnitud momento que se basa en el concepto de momento sísmico.

Ms = Magnitud de ondas superficiales basada en la amplitud máxima producida por las ondas superficiales Rayleigh.

2.2. Población de El Salvador

En el territorio salvadoreño, estimado en 21,050 km², hay un total de 6.25 millones de habitantes (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2009), con una densidad poblacional de 297 hab/km², lo que coloca a El Salvador en el 97avo país más densamente poblado del mundo, (Bernal, 2012).

Los departamentos con mayor densidad poblacional en la zona Central y Paracentral son San Salvador en primer lugar, La Libertad en segundo, Cuscatlán, La Paz, San Vicente y Chalatenango, mencionados de mayor a menor, Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Estadísticas demográficas de la Zona Central y Paracentral de El Salvador.
Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.

Departamento	Área (km²)	Total hab.	DENSIDAD POBLACIONAL (hab/km²)
San Salvador	886.15	1,567,156	1,768
La Libertad	1,652.88	660,652	400
Cuscatlán	756.19	231,480	306
La Paz	1,223.61	308,087	252
San Vicente	1,184.02	161,645	137
Cabañas	1,103.51	149,326	135
Chalatenango	2,016.58	192,788	96
Total	8,822.94	1,703,978	

San Salvador tiene 1768 hab/km² y según las proyecciones que realizó DIGESTyC para el 2013 la tendencia de la población son al incremento, lo que implica que en la ocurrencia de un sismo, el patrón se mantiene y el número de fatalidades tiende a aumentar de igual forma.

El número de ciudadanos en el año 1900 era de 801,000 habitantes, (Comisión Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres), mientras que en el año 2009 la población había crecido a 6.25 millones (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2009), con lo que se confirma el aumento de la población en la primer década del siglo XXI, Figura 2-9 (Comisión Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres).

El alza de fallecidos y heridos por lo tanto, no se debe a que el peligro y las amenazas del territorio hayan aumentado en magnitud o intensidad, tampoco se debe el fenómeno a un aumento en la frecuencia de la ocurrencia de los eventos sísmicos, sino más bien a la presión demográfica que la población ejerce sobre los espacios.

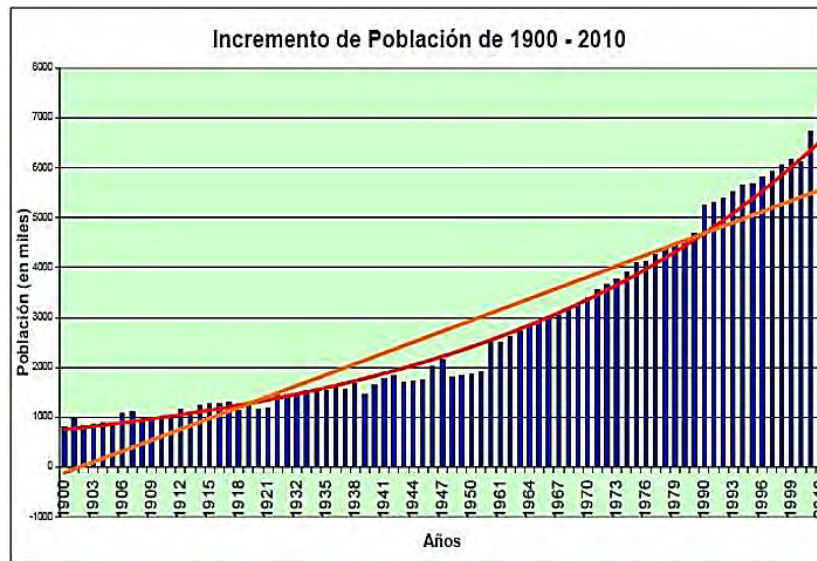


Figura 2-9 Incremento de población 1900 – 2010. Fuente: Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

Con este mismo razonamiento, es de esperar que el mayor número de víctimas mortales en los sismos provenga de los movimientos generados en San Salvador y zonas aledañas (sismos locales), donde como ya se determinó, se encuentra las mayores densidades de población del país, específicamente en el AMSS, Figura 2-10. Hay una correlación positiva entre densidad poblacional y número de muertes ocasionadas por sismos, (Comisión Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres).



Figura 2-10 Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. Fuente: Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador.

Como en todos o la gran mayoría de países en el mundo, debido a diversos factores sociales y económicos, la población se distribuye de manera desigual en el territorio; en particular la migración se concentra donde hay más oportunidades de empleo o de servicios, lo que conlleva, a departamentos que tienen una baja densidad demográfica, por ejemplo: Chalatenango, con únicamente 96 hab/km².

En la Figura 2-11 se muestra el número de habitantes agrupados de acuerdo a las zonas de El Salvador en donde se hace notorio el fenómeno de aglomeración en la Zona Central que representa aproximadamente el 50% del total de la población.

Los departamentos más poblados de El Salvador son: San Salvador, en la Zona Central; Santa Ana, en la Zona Occidental; y San Miguel en la Oriental. Por lo que al agrupar las Zonas Central y Paracentral se tiene que en la investigación se incluye el 57% de la población total del país.

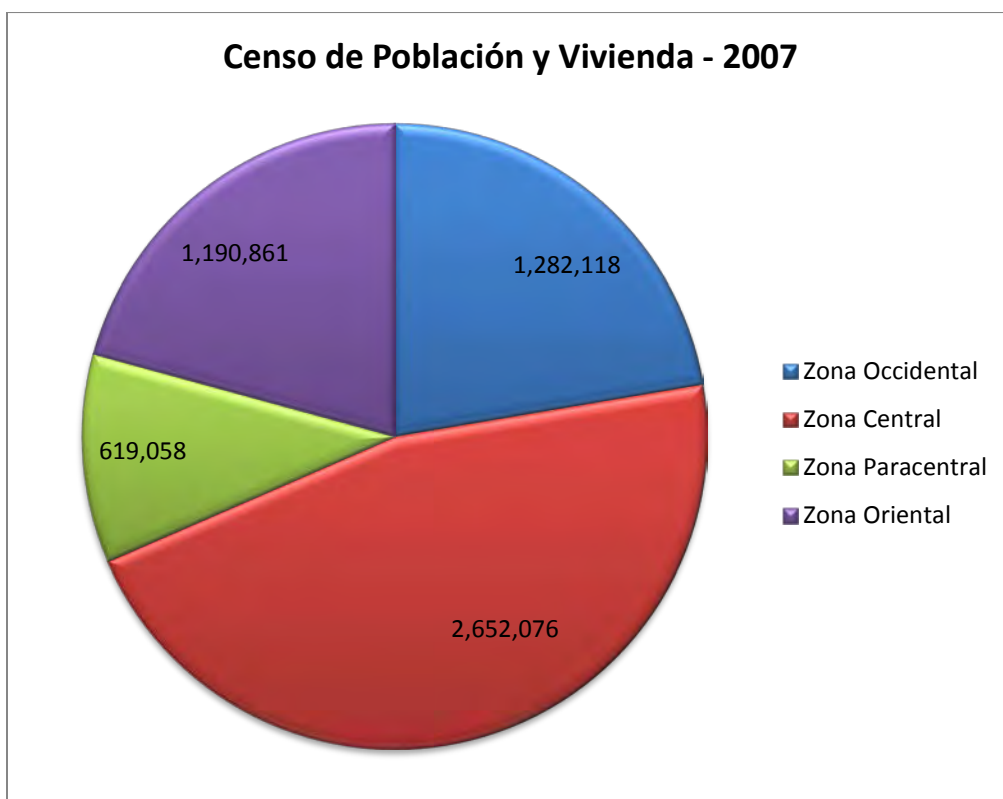


Figura 2-11 Población de El Salvador agrupada en zonas, según el Censo de Población y Vivienda 2007. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

En la Figura 2-12 se analiza el área de investigación donde se hace notar el fenómeno antes mencionado, San Salvador es el departamento con mayor densidad poblacional con 1,768 hab/km².

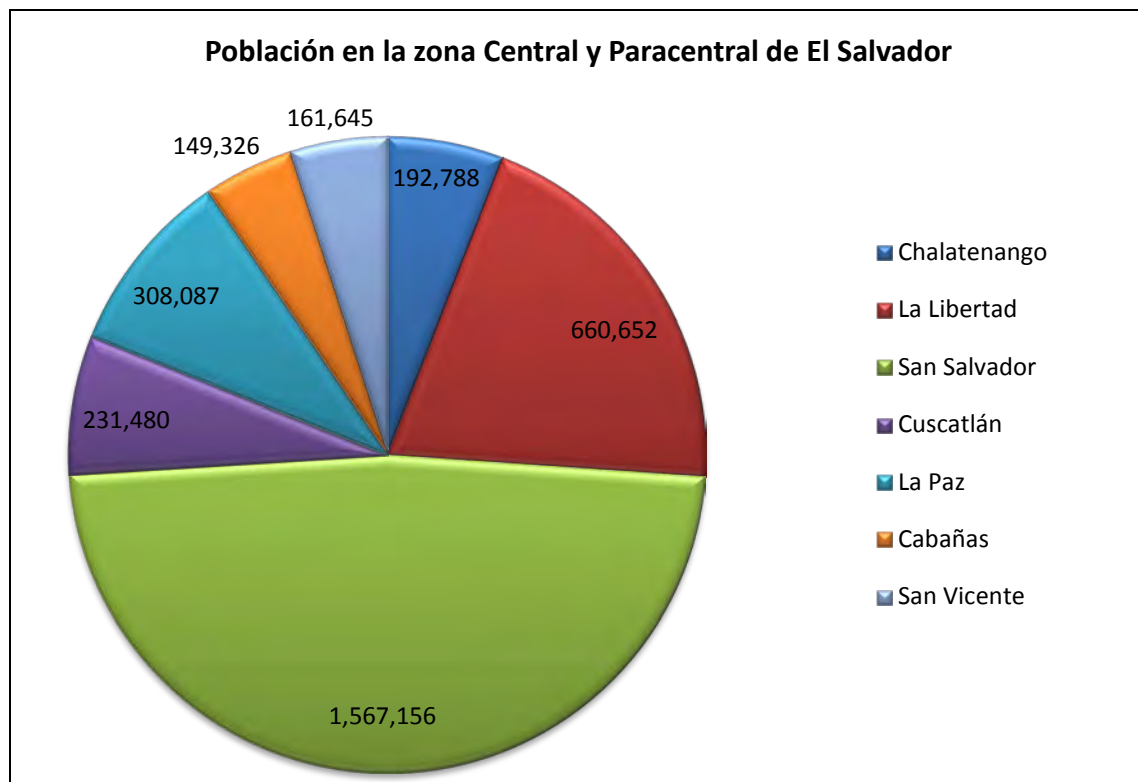


Figura 2-12 Población en la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

El hacinamiento poblacional en la ciudad de San Salvador y municipios aledaños como Soyapango, Apopa, Mejicanos, Cuscatancingo, entre otros, incrementa el factor de peligro al cual está sujeta la población, pues éstas se encuentran ubicadas en la zona de mayor peligro sísmico de El Salvador, lo que se detalla en el Capítulo 4.

A nivel mundial la población emigra a las ciudades en busca de oportunidades de mejores ingresos económicos y mejor calidad de vida, dicho fenómeno es similar en El Salvador, donde la población que reside en el área urbana representa el 63% del total, lo cual ocasiona que crezcan desproporcionadamente la exigencia de las necesidades básicas de la población. Como consecuencia de la situación planteada, se genera carencia de

vivienda digna, aumento de los asentamientos poblacionales en sitios de riesgo como son quebradas, laderas, etc.

Generalmente la población con menor poder adquisitivo, construye sus viviendas con alto grado de vulnerabilidad sísmica, pues son estructuras frágiles y débiles pues no poseen las características necesarias para poder soportar la carga lateral impuesta ante un sismo.

La falta de supervisión profesional con criterio técnico para proporcionar a la estructura el confinamiento necesario, el refuerzo y la distribución ideal para que ésta pueda desarrollar la resistencia ante el sismo aumenta la vulnerabilidad de la vivienda.

Factores importantes como la aglomeración y un mal plan de ordenamiento territorial del crecimiento del AMSS, genera que se propicien en los últimos años desarrollo de proyectos urbanos en zonas clasificadas como de riesgo de deslizamientos, por ejemplo en las laderas de las cordilleras circundantes de San Salvador, principalmente en la zona Sur – Oeste de la ciudad.

La construcción de proyectos en laderas con proyecciones inadecuadas, falta de planes de mitigación que busquen estabilizar los taludes, provocan la erosión y debilitamiento de la misma y aunque las viviendas no sean altamente vulnerables, la topografía y el entorno son factores importantes a considerar en un evento sísmico.

Como ejemplo de estos casos, la tragedia ocurrida en el sismo del 13 de enero de 2001 en la colonia “Las Colinas”, perteneciente al municipio de Santa Tecla, en el cual el sismo provocó que el suelo fallara debido al debilitamiento de su ángulo de reposo y la carga existente en la cumbre de la colina. El evento provocó el deslizamiento de un alud de tierra (aproximadamente $75,000 \text{ m}^3$) cubriendo más de 6 cuadras de viviendas, equivalente a 300 viviendas enterradas y un total de 500 personas fallecidas (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2001), Figura 2-13.



Figura 2-13 Deslizamiento de Las Colinas, terremoto 13 de enero de 2001. Fuente: La Prensa Gráfica.

2.3. Vivienda en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

Como ya se mencionó en la sección 2.2 de esta investigación, El Salvador al ser un país densamente poblado genera déficit de vivienda, además de los constantes desastres naturales ocurridos en la última década principalmente lluvias, esta carencia habitacional se incrementa. Únicamente en la zona estudiada y registros oficiales en organizaciones estatales, 27,356 familias están en espera de un espacio habitacional seguro donde residir (Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano, 2013), tanto en áreas rurales como urbanas.

De acuerdo a las estadísticas de vivienda de DIGESTyC el comportamiento de la tenencia de la vivienda a nivel nacional en El Salvador es mayoritario en zonas urbanas ya que representa el 65% del total del inventario, Figura 2-14.

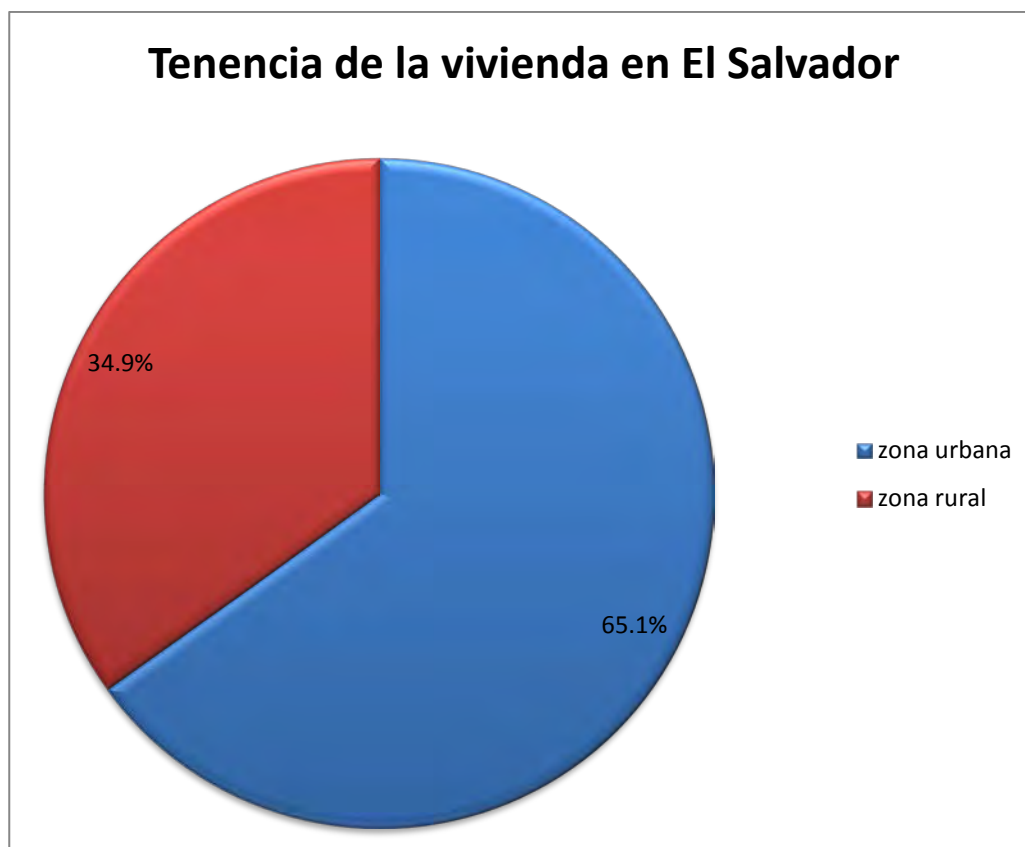


Figura 2-14 Comportamiento de la tenencia de vivienda en El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

La misma tendencia se refleja en la Zona Central y Paracentral, Figura 2-15, donde sigue siendo mayoritaria la vivienda en la zonas urbanas, sin embargo se evidencia un incremento en la misma pues representa porcentajes que rondan el 75% del universo; suceso que es de esperar ya que gran parte de los municipios del departamento de San Salvador son exclusivamente urbanos.

El análisis de la vivienda por cada departamento, es fluctuante dependiendo de la zona que se analice, si se toma el departamento de Chalatenango, Figura 2-16, el comportamiento de la misma es contrario de lo ocurrido a nivel nacional y en la zona de estudio, pues la vivienda se desarrolla más en las áreas rurales de los municipios. De acuerdo a la gráfica, el 66% se ubica fuera de las ciudades.



Figura 2-15 Comportamiento de la tenencia de vivienda en la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

En la Tabla 2-4 se muestra en resumen los porcentajes de la distribución de la vivienda en la Zona Central y Paracentral, es de hacer notar que los departamentos de mayor población urbana son San Salvador y La Libertad; y los departamentos con menor población urbana son Chalatenango y Cabañas representando únicamente el 34% y 37% respectivamente.

Tabla 2-4 Distribución de la vivienda en la Zona de Estudio. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

Departamento	Vivienda	
	Área Urbana	Área Rural
San Salvador	94.36%	5.64%
La Libertad	73.43%	26.57%
La Paz	51.48%	48.52%
San Vicente	48.81%	51.19%
Cuscatlán	43.51%	56.49%
Cabañas	37.27%	62.73%
Chalatenango	34.03%	65.97%

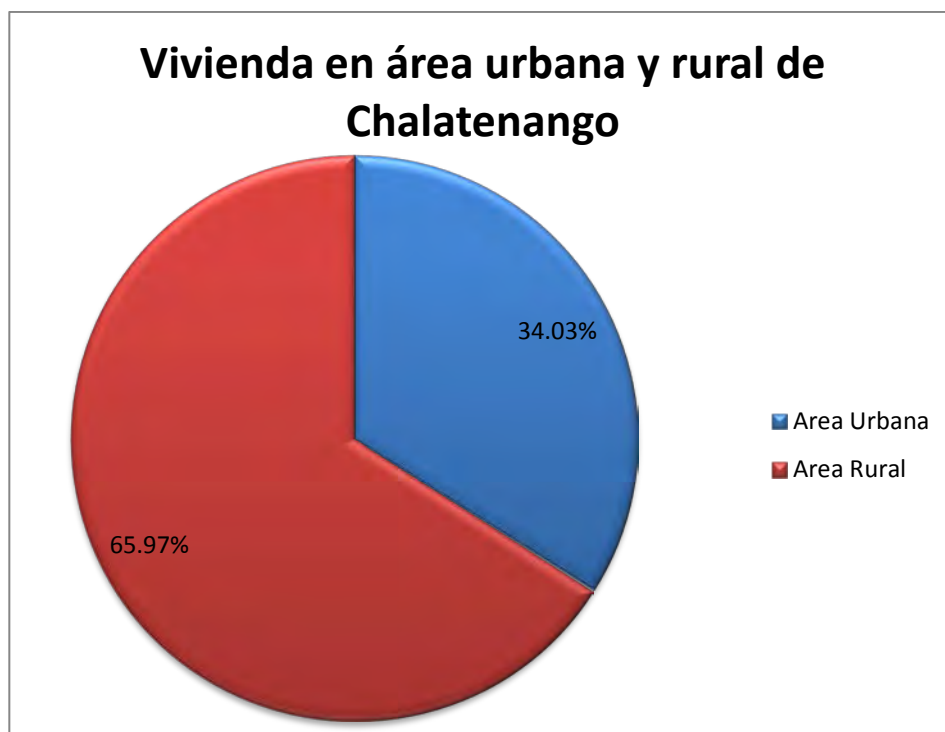


Figura 2-16 Vivienda en área urbana y rural en Chalatenango. Fuente: Elaboración propia con datos del Censo de población y vivienda realizado por la Dirección General de Estadísticas y Censos.

2.4. Evolución de los materiales de construcción El Salvador

El Salvador ha estado expuesto a sismos durante toda su historia por lo que los sistemas constructivos y materiales utilizados evolucionan constantemente y cambian a raíz de los daños producidos. Entre los cambios más importantes en el uso de materiales de la historia reciente se presenta a principios del siglo pasado donde es de notar que la estructura habitacional típica cambió por los eventos sísmicos ocurridos en esa época, Tabla 2-2, y el daño observado en las estructuras de adobe, otros materiales y construcciones débiles en sus refuerzos incapaces de soportar sismos.

El diseño de edificaciones sismorresistentes a nivel mundial es una ciencia joven, en países como El Salvador su estudio e incorporación en los diseños apenas tiene un par de décadas, por lo que la evolución de los materiales se realizó por métodos empíricos en los cuales, a prueba y error se adquirió el conocimiento de criterios técnicos para la resistencia de las estructuras a los sismos.

El tabique rojo fue de las primeras opciones por las cuales la población sustituyó el adobe y el bahareque para décadas después sustituirlo por el bloque de concreto, (Peña, López, & Guevara Morales, 2008), sin embargo existe un número importante de viviendas construidas con estos materiales.

Una situación particular se puede notar luego de los sismos de 2001, en los cuales muchas viviendas de adobe y bahareque colapsaron por lo que el número disminuyó; sin embargo en 2002, de acuerdo a las estadísticas, se refleja un incremento, Tabla 2-5, lo que se podría explicar que la población busca la reconstrucción de sus viviendas con los mismos materiales motivado por su idiosincrasia y por el costo que les representa estos sistemas constructivos (mucho menor al sistema mixto).

Tabla 2-5 Estadísticas de vivienda censadas por DIGESTyC. Fuente: Dirección General de Estadísticas y Censos.

Material	1998	1999	2000	2001	2002
Ladrillo de obra, bloque de concreto, mixto	837,668	863,940	913,872	981,139	1,029,978
Adobe	323,231	359,969	364,506	269,695	282,090
Bahareque	79,745	73,258	74,947	52,614	55,324

Los materiales de construcción tienen una fluctuación con respecto al tiempo de acuerdo a los eventos sísmicos ocurridos y la disponibilidad en el mercado de una alternativa más resistente que sea accesible a la economía familiar y de fácil construcción, sin embargo, la distribución de los espacios en la planta arquitectónica en la mayoría de los casos se ha mantenido constante, mismo fenómeno que se ha observado en México en las zonas de mayor actividad sísmica como lo son Chilpancingo y Ometepepec.

Sin embargo, sectores de la población han sido influenciados por una corriente de arquitectura norteamericana, específicamente de los Estados Unidos de América, debido a los factores socioeconómicos que implican la migración de personas hacia dicho país.

La planta arquitectónica de forma rectangular con pocos huecos, ha sido sustituida por una construcción más elaborada, el número de niveles se incrementa; así como también el material de construcción (adobe o bahareque), ha sido sustituido por el ladrillo de obra (tabique rojo) o bloque de concreto. La teja y el sistema de sostén de madera, sustituida por polines metálicos y lámina de fibro-cemento; sin embargo, se sigue manteniendo una forma geométrica muy regular.

El bloque de concreto fue introducido a El Salvador a mediados del siglo XX, éste tuvo buena aceptación en la población desde sus inicios hasta que su auge se dio en el último cuarto del siglo (Merlos, y otros, 2008) debido a la practicidad del sistema constructivo, el buen comportamiento estructural ante sismos, además del aspecto económico y la rapidez del avance en obra.

Después del sismo de 1965 que destruyó la ciudad de San Salvador y causó grandes daños en ciudades circundantes, se incorporó a la construcción de edificios el bloque de concreto; lo cual toma aún mayor apogeo, después del terremoto del 10 de octubre de 1986.

La construcción de mampostería de bloques de concreto se caracteriza por tener un refuerzo integral que incluye los materiales: bloque de concreto, acero de refuerzo, concreto fluido (tipo Grout) y mortero como aglomerante. Este sistema ha mostrado buen comportamiento sísmico, por ejemplo en 2001 las edificaciones (edificios habitacionales unifamiliares, multifamiliares y de comercio) construidas con este sistema mostraron daños mínimos.

La ventaja del sistema mixto utilizando bloques de concreto es que éstos poseen mayor control de calidad ya que su manufactura es industrializada en comparación a la producción del tabique rojo recocido. Sin embargo, estos materiales no tienen la total aceptación entre la población pues se sacrifica cierto porcentaje el confort térmico de la vivienda que proporcionan los materiales de tierra.

Capítulo 3 Métodos de evaluación de Vulnerabilidad Sísmica

Durante toda la historia, la humanidad ha sobrellevado fenómenos naturales de todo tipo, como sismos, inundaciones, huracanes, tornados, etc. de los que ha aprendido a comprenderlos, a mitigar los daños que generan y a defenderse de ellos. Los sismos sin embargo, son un fenómeno extremadamente complejo que hasta el día de hoy se está trabajando por tratar de encontrar un comportamiento que permita al ser humano predecirlos y con esto minimizar o anular las pérdidas humanas y económicas.

En esta lucha, se comprendió que si bien no es posible controlar el fenómeno sísmico en las regiones, se puede trabajar con las estructuras mismas de la región. El riesgo sísmico es un concepto de orden social y económico que estima la probabilidad de pérdidas en vidas humanas o materiales debido a un terremoto (Unión Europea, 2003-2006) y se expresa como la combinación del peligro sísmico y la vulnerabilidad de las estructuras, Ecuación 3-1

Ecuación 3-1

$$\text{Riesgo sísmico} = \text{Peligro sísmico} * \text{Vulnerabilidad sísmica}$$

El peligro sísmico es la probabilidad de la ocurrencia de un terremoto de determinada magnitud o intensidad en un periodo determinado de tiempo, para lo que se debe conocer la historia sísmica de la región. La vulnerabilidad sísmica es la probabilidad que una estructura sufra daños ante un determinado sismo y representa una característica propia de la estructura sin que influya el peligro sísmico de la región.

Con esta lógica, los países como Japón y Estados Unidos, comenzaron a desarrollar investigaciones para poder medir la vulnerabilidad sísmica y detectar los sectores de la población más críticos y con mayor necesidad de atención ante un evento sísmico. A continuación, se describen algunas de las teorías desarrolladas para el estudio de la vulnerabilidad sísmica.

3.1. Teoría de vulnerabilidad sísmica

En el siglo XX ocurrieron varios eventos sísmicos de importancia, Tabla 3-1, que dio paso al desarrollo de los estudios de vulnerabilidad. Sin embargo, fue hasta las décadas de los 60's y 70's en las cuales nacen las primeras técnicas para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los edificios ya existentes las cuales fueron denominadas como **Técnicas de Screening**, siendo éstas la base de todas las técnicas desarrolladas hasta la actualidad, (Llanos López & Vidal Gómez, 2003).

Tabla 3-1 Algunos sismos importantes del siglo XX.

Fecha	Ubicación	Magnitud
1902	Guatemala	7.5
1905	India	7.5
1906	Ecuador	8.8
1906	California	7.8
1906	Chile	8.2
1931	China	8.0
1933	Japón	8.4
1946	Japón	8.1
1950	China	8.6
1960	Chile	9.5
1971	California	6.6
1985	México	8.0
1994	California	6.7
1995	Japón	6.9

A finales de la década de los 70's, la United Nations Disaster Relief Coordinator, UNDRO en conjunto con la UNESCO, definieron los términos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo con el fin de unificar y comprender con más claridad los problemas asociados a fenómenos naturales (Llanos López & Vidal Gómez, 2003).

El **riesgo natural** significa la probabilidad de ocurrencia, dentro de un periodo específico de tiempo en un área determinada de un fenómeno natural potencialmente perjudicial, (Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, 1980); siendo un **riesgo sísmico**, cuando el fenómeno natural del que se trata es un sismo.

Desde el punto de vista estadístico, **riesgo sísmico** es la probabilidad de una pérdida durante un período de tiempo definido. Esta probabilidad depende de dos factores: primero que ocurra un movimiento sísmico en el lugar donde se encuentra la estructura; y segundo, que la estructura en mención sufra daños a causa del movimiento, (Peña López, 1997). Sobre este el primero no se puede tener control ya que por definición es propia del sitio, sin embargo, se puede llegar a conocer mejor cuantificando la sismicidad y la atenuación de las ondas sísmicas.

Por otro lado, **vulnerabilidad** significa el grado de pérdidas de un elemento o un conjunto de elementos dado un riesgo resultando de la ocurrencia del fenómeno natural de una magnitud. Esta se expresa en una escala de 0 que significa NO daño hasta el 1, donde se refleja la pérdida total (Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator, 1980). Este parámetro, puede ser controlado tomando medidas de reducción de vulnerabilidad, siendo estas la adopción de normas sismo-resistentes, más control en la calidad de las estructuras, reordenamiento los asentamientos humanos, etc.

En contexto urbano, la Vulnerabilidad sísmica como factor de riesgo no se debe relacionar solo con la exposición del contexto material o la susceptibilidad física de los elementos estructurales; sino también con las fragilidades sociales y la resiliencia de la comunidad en cuestión, esto último relacionado con las capacidades de respuesta y recuperación.

La vulnerabilidad, en términos más modernos y asociada a eventos multi-peligro, está relacionada con la dimensión física, económica, social, educativa, política, institucional, cultural, ambiental e ideológica, (Juárez García, 2010).

En esta investigación, se aborda únicamente la dimensión física de la vulnerabilidad sísmica; además se proporciona una descripción de las características de las edificaciones y mapas donde se ubica a las áreas más vulnerables.

Existen muchos métodos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, que se aplican a edificaciones, como lo son el uso de funciones empíricas, métodos simplificados de análisis sísmico, métodos analíticos (el método dinámico modal espectral y análisis no lineal de estructuras). Dichos métodos se basan en parámetros asociados con las características geométricas, de procesos constructivos, estructurales, características de los suelos, entre otros, (Maldonado Rondón, 2007).

La selección del método a utilizar en el estudio de vulnerabilidad sísmica debe incluir factores como la naturaleza y objetivo del estudio, la información disponible, características del elemento que se desea estudiar, metodología de evaluación empleada, resultado esperado y destinatario de la información (Arellano Méndez, 2005).

3.2. Sistemas de evaluación de vulnerabilidad

La clasificación de los métodos para determinar la vulnerabilidad sísmica de los edificios existentes, en esta investigación, se divide en dos ramas: **vulnerabilidad calculada y vulnerabilidad observada**, Figura 3-1, cada uno tiene sus ventajas y desventajas dependiendo de la información que se tenga disponible en el estudio.

Los **métodos de vulnerabilidad observada** dependen principalmente del juicio y experiencia del evaluador, utiliza guías empíricas que son el resultado de los registros de daños ocurridos en el pasado; y tienen como objetivo evaluar de forma rápida y sencilla las condiciones de seguridad estructural de una edificación (Rivas Reyes & Vásquez Rubio, 2008).

Los **métodos de vulnerabilidad calculada**, se basan en la estimación de cargas sísmicas a través de métodos de análisis de estructuras, entre los cuales se puede

mencionar un análisis dinámico, análisis modal o el de la carga lateral equivalente. Estos métodos son muy parecidos a los de diseño de estructuras nuevas, sin embargo, la diferencia radica en la ductilidad de la estructura. En las edificaciones nuevas el diseñador provee un nivel de ductilidad en cambio, en una existente es un parámetro propio de las estructuras y muchas veces incierto (Rivas Reyes & Vásquez Rubio, 2008).

Los **métodos analíticos** son aplicables para estructuras específicas en donde se recalcula su resistencia ante sismos y además se analiza el comportamiento dinámico por medio de un análisis no lineal (Rivas Reyes & Vásquez Rubio, 2008).

Es importante que la selección del método de análisis para determinar la vulnerabilidad incorpore los propósitos de la investigación y además las condiciones e importancia de las estructuras (Peña López, 1997).

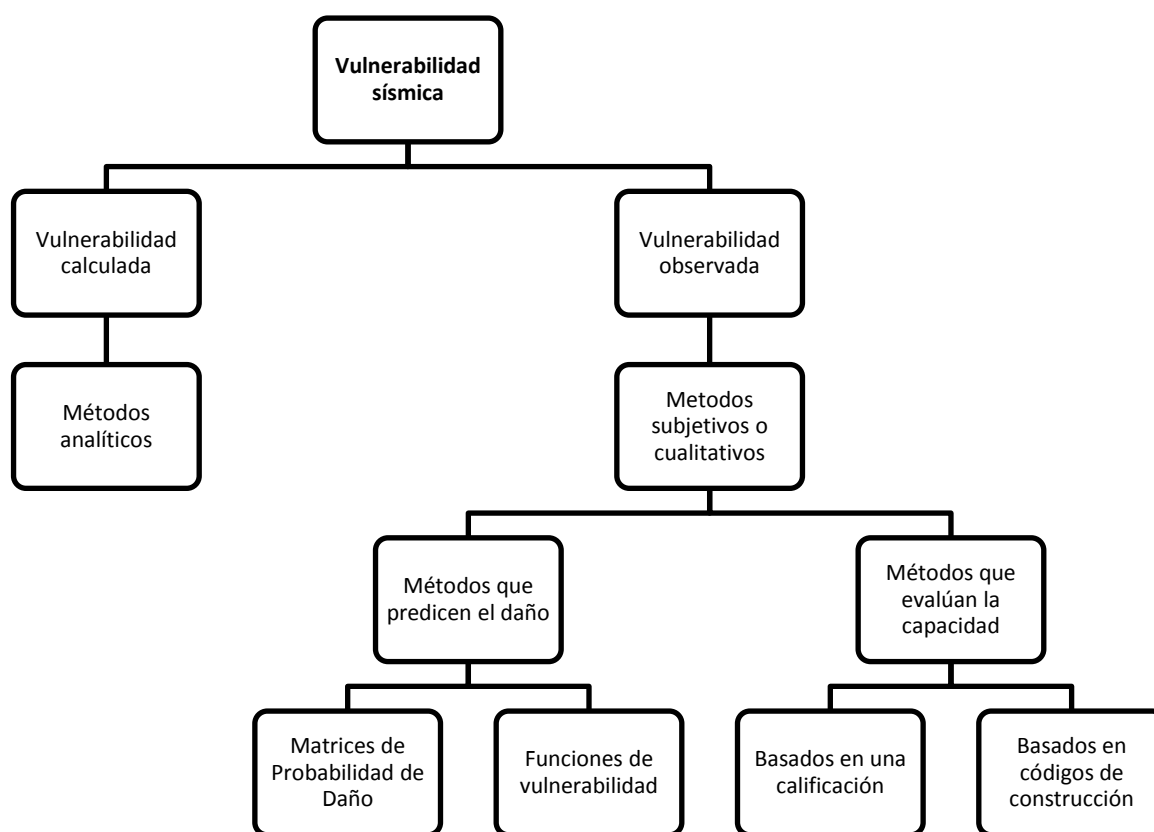


Figura 3-1 Métodos de evaluación de vulnerabilidad sísmica.

3.3. Vulnerabilidad Calculada

La estimación de la vulnerabilidad calculada se realiza por medio de modelos estructurales en programas por computadoras con el fin de conocer el comportamiento de la estructura sometida a diferentes tipos y combinaciones de cargas.

Además, se deben realizar pruebas de laboratorio para determinar las propiedades de los materiales y los estados de daño que pueden soportar ante diferentes niveles de carga. La calibración de estos métodos se realiza por medio de la comparación de los daños reales observados en eventos sísmicos históricos con los datos obtenidos del laboratorio y modelos.

Dentro de la clasificación de vulnerabilidad calculada se encuentran los métodos analíticos los cuales se basan en modelos calibrados en los que se realizan análisis dinámicos inelásticos de la estructura para poder obtener el proceso de plastificación paso a paso hasta el punto de colapso.

Estos métodos son de compleja aplicabilidad, desde el modelado de la estructura hasta el análisis y evaluación del comportamiento del edificio ante la posibilidad de ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes. Algunos de los aspectos fundamentales para obtener resultados son la calidad de información que se posea de las estructuras y de la aproximación a la realidad del modelo.

3.4. Vulnerabilidad Observada

Como su nombre lo indica, la vulnerabilidad observada tiene su fundamento en la observación, la recolección estadística de los registros históricos de daños ocurridos, la opinión de los expertos en cuanto al posible comportamiento de los diferentes tipos de estructuras, entre otros.

La ventaja de estos métodos es la aplicación rápida y certera para un estudio que abarca varias tipologías estructurales y el número de edificaciones es importante, esto puede ser, barrios, colonias, ciudades, estados, etc.

Dentro de la clasificación de vulnerabilidad observada, se encuentran los métodos subjetivos o cualitativos los cuales incluyen la evaluación por medio de predecir daños ó evaluando la capacidad de la estructura.

3.4.1. Métodos basados en la evaluación de la capacidad

Estos métodos usan escalas determinadas para poder calificar la calidad de las distintas tipologías estructurales, las cuales incluyen la funcionalidad, los procesos constructivos, materiales utilizados en la construcción, configuraciones arquitectónicas, antigüedad de la edificación, entre otros aspectos; a los cuales se les asigna una determinada calificación.

Entre los métodos que evalúan la capacidad de las estructuras, se encuentran los métodos basados en una calificación y los métodos basados en los códigos de construcción, sin embargo, la desventaja del segundo es la inaplicabilidad en diferentes países pues los códigos varían de acuerdo a la región.

a. Método del índice de vulnerabilidad

Es un método que corresponde a un sistema de puntuación que evalúa el índice de vulnerabilidad sísmica de los edificios, basada en la propuesta del ATC – 21, sin embargo se adicionan consideraciones que incorporan en el análisis las características específicas del sitio como características del suelo, tipo de cimentación, entre otros. (Mena Hernández, 2002).

Los índices de vulnerabilidad son parámetros que cuantifican la susceptibilidad de las estructuras a sufrir daños, esto permite tener tipologías estructurales y correlacionar los factores de evaluación (Safina Melone, 2002). En este método se puede clasificar como subjetivo ya que se realiza por medio de la observación y algunos casos en cálculos simplificados, sin embargo, una de las ventajas es que se puede aplicar a estructuras individuales y en escala urbana.

Existen varios métodos del índice de vulnerabilidad, por ejemplo el propuesto por Benedetti y Petrini en 1982, el utilizado por Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT,1990), entre otros, (Mena Hernández, 2002) y (Safina Melone, 2002).

b. Métodos Japoneses

Método expedido oficialmente en Japón por el Ministerio de Construcción, para la revisión de edificios de concreto de mediana y baja altura, construidos en zonas sísmicas, el cual consta de tres niveles de evaluación que va de lo simple a lo detallado.

El método se basa en la calificación del comportamiento sísmico de cada piso de la estructura por medio de un índice en el que se incorpora aspectos como la resistencia de los elementos verticales, ductilidad, estado de la construcción y comportamiento en sismos anteriores, simetría y forma en planta, aberturas en el diafragma, topografía, y geotecnia. (Cardona A, 1993).

La característica más importante del método es que confiere mayor importancia al análisis de resistencia que al de los esfuerzos internos que eventualmente podría presentar un sismo dado en los elementos de la estructura (Cardona A, 1993).

Además, el método confiere gran importancia al establecimiento de los mecanismos de falla y disipación de energía de los elementos los cuales clasificados en diversos grupos de acuerdo a su comportamiento y tipo de falla (Cardona A, 1993).

c. Métodos a partir de la opinión de expertos

Las curvas de fragilidad pueden ser generadas a partir de la opinión de expertos en áreas como análisis, diseño y patologías de estructuras; en la cual se da respuesta a una serie de interrogantes relacionadas con el comportamiento de la estructura(as) en estudio (Bonett Díaz, 2003).

A partir de estas opiniones, se calcula un parámetro cuantificador que es función de la intensidad del movimiento del terreno para cada tipo de estructuras existentes en el

estudio. Cuando se tengan estos factores, se calcula un estadístico y se ajusta una función de distribución de probabilidad.

La etapa subsecuente es fijar los estados discretos de daño que se desee considerar, en el que se determinan intervalos de variación del parámetro cuantificador del daño (Bonett Díaz, 2003).

Las probabilidades para cada estado de daño se pueden determinar integrando la función de distribución elegida entre los límites de cada intervalo fijado anteriormente. Finalmente, la curva de fragilidad se obtiene graficando las probabilidades para cada valor de la intensidad sísmica (Bonett Díaz, 2003).

Además de las incertidumbres intrínsecas en el cálculo de la estimación del daño debido a la variabilidad en el actual desempeño de las estructuras, utilizando este método se debe adicionar las incertidumbres relacionadas con las opiniones de los expertos (Anagnos, Rojahn, & Kiremidjian, 1995).

d. FEMA

A finales de la década de los 70's se fusionaron varias agencias dedicadas a la prevención y mitigación de desastres de origen natural como provocados por el hombre, dando origen a la Agencia Federal de Manejo de Emergencias, FEMA de aquí en adelante.

El FEMA incluye sectores de estudio desde los desastres por sismo, inundaciones, incendios hasta actos terroristas; entre los apartados que conciernen a los sismos, se pueden mencionar el FEMA 273, FEMA 222, FEMA 172, FEMA 440, entre otros.

FEMA 173 es una guía técnica para la rehabilitación sísmica de edificios existentes, fue inicialmente producido por una empresa de diseño técnico en ingeniería.

FEMA 178 es un método empleado para la evaluación y diagnóstico de un edificio existente en el que se determina la capacidad sísmica del mismo y si representa peligro al ser utilizada. Este método puede ser aplicado anteriormente al sismo sin embargo, es

frecuentemente utilizado después de un evento como un procedimiento de evaluación rápida.

La limitación de este método es que está basado en el criterio de seguridad de vida y no dirige sus objetivos al control de daño y uso continuo (National Earthquake Hazard Reduction Program, 1994).

El **FEMA 222-A y 223-A** tratan sobre las recomendaciones sísmicas para edificios nuevos. Sin embargo, la última versión de todos estos documentos es el **FEMA 440** el cual fue preparado como un proyecto de Applied Technology Council, en 2005.

FEMA 273 trata sobre pautas técnicas aceptables para la rehabilitación sísmica de edificios enfocada a ser utilizada por los profesionales de campo en diseño como una referencia normativa. Desarrolla métodos y criterios de diseño para alcanzar diferentes niveles de desempeño sísmico.

Estos niveles de desempeño, se dividen en cuatro, **prevención de colapso**, donde la única restricción de daños y pérdidas es que el edificio no colapse. **Seguridad de vida**, este nivel de daño permite que la estructura se mantenga estable y el peligro por los elementos no estructurales es a nivel controlable. **Ocupación inmediata**, la estructura tiene daños menores y la ocupación de las instalaciones no representa ningún peligro para la población; y **operacional** donde la estructura tiene un daño mínimo o inexistente y las operaciones pueden seguir normalmente (Federal Emergency Management Agency, 1997).

El principal logro de este documento fue la evaluación y la mejora de los procedimientos estáticos no lineales contenidos en la versión de FEMA 356 y en el ATC – 40. Además del desarrollo de una guía de la metodología dónde y cuándo utilizarlos de acuerdo a cada situación en particular.

e. Método ATC

El Consejo de Tecnología Aplicada, ATC en adelante, en el año 1985 desarrolló el “ATC 13 – Earthquake Damage Evaluation Data for California”, documento en el cual se incluyen cuatro tareas primarias (Applied Technology Council, 1985):

- **Identificar y caracterizar los sismos**, en cuanto a la estimación de daños y pérdidas.
- **Desarrollar esquemas para la clasificación de las instalaciones** en las que se consideran las 36 tipologías de estructuras existentes en California, de las cuales se desglosan los edificios de marcos de concreto, de acero, madera, mampostería, entre otros.
- **Desarrollar la relación entre los daños y pérdidas debidas al sismo estimadas en términos de la caracterización de la intensidad del sismo (MMI) y la clasificación de las instalaciones.**
- **Desarrollar datos de inventario y una metodología consistente con la clasificación de las instalaciones y el inventario de los datos disponibles en FEMA.**

Al igual que el FEMA, éste se caracteriza por ser un método, que destaca la importancia de determinar los puntos débiles del edificio con base a la observación de daños en estructuras similares, producidos por eventos anteriores.

En este método el daño físico esperado y el absorbido por el sismo se relacionan con Matrices de Probabilidad de Daño (MPD). Para cada tipo de instalación, la MPD expresa la probabilidad de tener cierto estado de daño dado una escala de intensidad (MMI), (Juárez García, 2010).

El procedimiento consiste en calcular los esfuerzos cortantes actuantes y las distorsiones de entrepiso. Con las fuerzas cortantes se calcula el esfuerzo promedio de los elementos resistentes verticales del edificio, para luego compararlo con el esfuerzo estimado del material mediante la razón del esfuerzo promedio dividido por un factor

determinado. Si el resultado de la comparación es menor a 1, indica que la estructura no resiste los esfuerzos cortantes y requiere de un análisis estructural con más refinamiento (Llanos López & Vidal Gómez, 2003).

El método ATC – 21 es también conocido como “Rapid Visual Screening Buildings for potencial Seismic Hazards”. Consiste básicamente en asignarle calificaciones iniciales a las edificaciones y luego, agregar o quitar puntos de acuerdo a sus características estructurales. La calificación inicial depende del tipo de estructura y diseño sismorresistente (Applied Technology Council, 2002).

Algunos parámetros incluidos para tener el criterio de sumar o restar puntuación es altura del edificio y número de entrepisos, espesor de paredes, región sísmica, material de construcción, año de construcción, uso de la estructura, entre otros (Applied Technology Council, 2002).

f. Método HazUS

Hazard U. S., HazUS, es un software desarrollado en los Estados Unidos por FEMA en 1999, con el fin de estimar las potenciales pérdidas en un desastre, ya sea este por terremotos, inundaciones, huracanes y tornados. La función del programa es evaluar la vulnerabilidad sísmica de manera aproximada, empleando el método del Espectro de Capacidad que fue calculado para 36 tipologías estructurales, las cuales son las existentes en California de acuerdo al levantamiento realizado por FEMA.

HazUS utiliza Sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar el impacto físico, económico y social de los desastres. Muestra gráficamente los impactos identificando las localidades de alto riesgo debido a los terremotos, huracanes y deslizamientos de tierra (Federal Emergency Managment Agency, 2013), asimismo, presenta en forma aproximada los espectros de capacidad de las tipologías estructurales para el modelo bilineal del Espectro e indica los valores del punto de fluencia y del punto de colapso.

El procedimiento a seguir para utilizar este método, es obtener el Espectro de Capacidad de la estructura en la cual se aplican cargas monotónicas crecientes hasta llegar al colapso, con lo cual se puede obtener el cortante basal y la distorsión de azotea.

El método presenta valores para cuatro niveles de daño para cada prototipo de edificio: **alto, medio, bajo y nulo** y la probabilidad de ser excedido cada estado es determinado por medio de curvas de fragilidad.

Sin embargo, cabe destacar, que este método fue diseñado específicamente para la realidad de los Estados Unidos, por lo cual para poder utilizarlo será necesario realizar una adaptación a las condiciones particulares de cada región.

Los métodos cualitativos son útiles para evaluar de forma rápida y sencilla un conjunto de edificios, para obtener resultados estimados de vulnerabilidad de las mismas, con lo que se puede evaluar el comportamiento de una zona determinada.

La evaluación de vulnerabilidad sísmica de un conjunto de edificios se realizó por primera vez en la década de los 70's por medio de métodos empíricos inicialmente desarrollados y calibrados en función de intensidades macrosísmicas (Zahran, 2009).

g. Escala Macrosísmica Europea (EMS)

La propuesta del EMS-98 (Gruntal, 1998) clasifica los tipos de estructuras en seis clases de vulnerabilidad iniciando en A, la que es de mayor vulnerabilidad, hasta la F, la menos vulnerable, Tabla 3-2. Clasifica las estructuras de acuerdo a los materiales de construcción y el nivel de diseño sísmico, (Safina Melone, 2002).

La selección del área de estudio se enfoca de dos maneras, la primera es elegir una zona en la cual históricamente han ocurrido eventos y presentado daños en las estructuras; la segunda es elegir una zona desarrollada recientemente que no ha sido sometida a la acción sísmica pero tiene importancia social y/o económica por lo que es importante estimar pérdidas (Arellano Méndez, 2005)

Algunos de los criterios de calificación de la estructura que incluye el método son el año de construcción del edificio, regularidad, número de niveles, tipo de cimentación, mantenimiento, daños anteriores, número de habitantes, material de construcción, entre otros (Arellano Méndez, 2005).

Tabla 3-2 Clasificación de los tipos de estructuras según su clase de vulnerabilidad. EMS - 98 (Grüntal, 1998)

	Tipo de Estructura	Clase de vulnerabilidad					
		A	B	C	D	E	F
Mampostería	Piedra cruda, sin tallar						
	Adobe (ladrillo de tierra)						
	Piedra tallada						
	Sillería						
	No reforzado c/bloque de concreto						
	No reforzado c/forjado de HA						
	Reforzado / confinada						
Hormigón Armado (HA)	Marcos sin diseño antisísmico (DAS)						
	Marcos con moderado nivel de DAS						
	Marcos con alto nivel de DAS						
	Muros sin diseño antisísmico (DAS)						
	Muros con moderado nivel de DAS						
	Muros con alto nivel de DAS						
Metálica	Estructura metálica						
Madera	Estructuras de madera						

Donde

La más probable

Probable

Poco probable, casos excepcionales



Una de ventaja del método EMS-98 como medida de intensidad sísmica, es que incluye los patrones de grietas que pueden presentarse en estructuras de concreto y mampostería, clasificando el daño en cinco grados.

	<p>Grado 1: Daños de despreciables a ligeros <i>(ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)</i> Grietas superficiales en muy pocos muros. Caída sólo de pequeños trozos de recubrimiento. Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.</p>
	<p>Grado 2: Daños moderados <i>(daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados)</i> Grietas en muchos muros. Caída de trozos bastante grandes de recubrimiento. Colapso parcial de chimeneas.</p>
	<p>Grado 3: Daños de importantes a graves <i>(daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)</i> Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros. Caída de tejas, Fractura de chimeneas por la línea del techo, falla de elementos individuales no-estructurales (muros divisorios y tejados).</p>
	<p>Grado 4: Daños muy graves <i>(daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves)</i> Se dañan seriamente los muros; falla estructural parcial de techos y losas.</p>
	<p>Grado 5: Destrucción <i>(daños estructurales muy graves)</i> Colapso total o casi total.</p>

Figura 3-2 Clasificación del daño en estructuras de mampostería. Fuente: Vulnerabilidad sísmica en Chilpancingo y colonia Roma, Eduardo Arellano Méndez.

3.4.2. Métodos que predicen el daño

La evaluación se hace por medio de una relación discreta en base a matrices de probabilidad ó por una relación continua basada en funciones de vulnerabilidad (Peralta, 2002).

a. Curvas de fragilidad

Las funciones del daño son la relación entre los niveles de daño y el correspondiente movimiento del terreno. Estas funciones se pueden derivar de forma empírica o analítica (McGuire, 2004).

Curvas de fragilidad, representan la probabilidad de que una estructura exceda un determinado estado de daño en función de un parámetro que define la intensidad sísmica (Agudelo C. & López Rodríguez, 2009).

Las curvas relacionan un índice de vulnerabilidad con un índice de daño, condicionado por un parámetro que describe el movimiento del terreno, por ejemplo aceleración máxima, una escala de intensidad sísmica como la Escala Macrosísmica Europea (MSK), Escala de Intensidad de Mercalli Modificada (MMI), entre otros.

Dos de los métodos más utilizados basados en la escala de Intensidad de Mercalli Modificada son los de **ATC-85** y el de **Steinbrugge 1982** (McGuire, 2004). Sin embargo, las curvas propuestas por el ATC-85 representan el factor de daño medio derivado de la opinión subjetiva de la opinión de expertos.

Las curvas de fragilidad son herramientas utilizadas en diversas áreas de la sociedad, por ejemplo en la ingeniería para el diseño e investigación, en el área económica por las aseguradoras para conocer las probabilidades de daños y el riesgo, en el gobierno para crear líneas vitales (hospitales, carreteras, entre otros); debido a que con ellas se puede evaluar el riesgo sísmico de los sistemas estructurales. El daño de una estructura se normaliza con respecto al costo del reemplazo total de la misma, es decir, se divide el costo de reparación entre el costo total de la estructura (McGuire, 2004).

En una caracterización generalizada, las curvas de fragilidad se definen a partir de cuatro criterios:

- Métodos basados en observaciones de campo.
- Métodos experimentales.

- Métodos basados en la opinión de expertos.
- Métodos analíticos.

Sin embargo, todos los métodos tienen en común ajustar una función de distribución lognormal a los resultados obtenidos, para que así sea posible la determinación de las probabilidades de exceder o igualar un estado discreto de daño (EDi) para cierto valor de parámetro indicador de la intensidad sísmica (PIS), es decir:

Ecuación 3-2

$$P\left(ED > \frac{EDi}{PIS}\right) = \Phi\left(\frac{1}{\beta_{PIS,EDi}} \ln\left(\frac{PIS}{\overline{PIS}}\right)\right)$$

Donde:

Φ = es la función Gaussiana acumulativa complementaria.

\overline{PIS} = es la media del logaritmo natural de PIS para un estado de daño EDi

$\beta_{PIS,EDi}$ = es la desviación estándar del logaritmo natural de PIS para un estado de daño EDi.

Estos valores, se determinan por medio de un ajuste de mínimos cuadrados sobre las probabilidades obtenidas mediante cualquier método de evaluación (Bonett Díaz, 2003).

La Ecuación 3-2 requiere una distribución de probabilidad sobre los daños cuando los valores se dan en la escala MMI. Esto significa que es requerida una forma de la distribución y una medida de la dispersión, además un daño medio o mediano (McGuire, 2004).

Métodos basados en observaciones de campo

Es un método útil para poder calibrar resultados obtenidos con los métodos analíticos, el procedimiento para la aplicación es **definir las tipologías de las estructuras y**

definirlas en clases de acuerdo a sus propias características (geometría, uso, importancia, etc.).

En cuanto a los parámetros del sismo, se determinan las intensidades en cada zona en que se encuentren las estructuras estudiadas; y en base a estos parámetros es posible generar las curvas de fragilidad de las tipologías ya definidas al inicio del estudio.

A pesar de ser un método muy práctico, no es de sencilla aplicación ya que requiere amplio criterio para la generación de los formularios de inspección con los cuales se pueden obtener datos fidedignos de daños existentes en las estructuras, sin que sean afectados por las incertidumbres propias de la subjetividad de los criterios de cada aplicador.

El procedimiento a seguir para construir curvas de fragilidad de una estructura a partir de los daños observados, se resume en los siguientes pasos (Bonett Díaz, 2003):

- Se tiene una cantidad “n” de sismos de los cuales se dispone de los datos de daños. Para cada sismo “i”, se determina el parámetro que caracteriza la intensidad del movimiento, por ejemplo, la aceleración máxima del terreno a_i registrada en cada zona, esto es:

Ecuación 3-3

$$a_i = PGA_i$$

Para $i = 1, 2, 3, \dots, n$

Donde $a_1 < a_2 < \dots < a_n$

- Determinar el número de estructuras N_k sometidas a un sismo i con una aceleración máxima del terreno igual a a_i .
- Definir y describir el número de estados discretos de daños ED_j .
- Cálculo del número de estructuras m_1 que exceden los estados de daño ED_j para cada a_i .

- Para cada estado de daño ED_j , se estima la probabilidad de fallo f_i de la estructura cuando se ve sometida a un sismo con una $PGA = a_i$, mediante la expresión

Ecuación 3-4

$$f_i = \frac{m_1}{N_k}$$

- Ajuste de la función de distribución para el grupo de datos obtenidos (a_i, f_i) correspondientes a cada estado de daño ED_j .

Por la naturaleza subjetiva del método, se recomienda utilizarlo para evaluar el comportamiento sísmico de un grupo de estructuras de la misma tipología, con lo que se tendrá un parámetro del desempeño sísmico; sin embargo, no se debe utilizar para evaluar una estructura en particular (Bonett Díaz, 2003).

Métodos analíticos

Son aplicados cuando no se cuentan con suficientes datos históricos de las observaciones de daño causados por los eventos sísmicos, ni datos de ensayos de laboratorio.

Al utilizar los métodos analíticos para la estimación de daños se reconoce que la estructura tiene un comportamiento no lineal durante un fuerte sismo. Por ejemplo, para una representación simple de una estructura la no linealidad puede ser mostrada mediante la curva fuerza – deformación, mostrando la fuerza lateral requerida para causar un rango de desplazamientos (McGuire, 2004).

El método del Espectro de Capacidad, descrito en el ATC 1996, asume que cuando la estructura es sometida a un sismo y sobrepasa su punto de fluencia, el amortiguamiento efectivo de la estructura se incrementa al igual que el periodo fundamental (McGuire, 2004).

Al obtener la respuesta de la estructura ante los niveles de demanda sísmica, se procesa la información estadísticamente del nivel de daño encontrado para obtener las curvas de fragilidad.

Del planteamiento no-lineal de la estructura propuesto, se calcula la respuesta y se construyen las funciones de distribución de probabilidad del daño alcanzado, que representa la vulnerabilidad mediante las curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño.

La **ventaja** de este método, es que no se necesita de la ocurrencia de un evento sísmico para medir la vulnerabilidad de las estructuras, sino puede ser un método para reducirla y por ende, el riesgo de las estructuras como prevención de desastres.

Métodos experimentales

El procedimiento para obtener las curvas de fragilidad a partir de ensayos de laboratorio, puede ser el mismo que el utilizado en procedimiento de observaciones de campo en el cual se toman las observaciones del daño de los especímenes. Sin embargo, el método tiene la **desventaja** del alto costo de las pruebas y la limitada cantidad de daños observados en concordancia al número de ensayos realizados en el laboratorio (Bonett Díaz, 2003).

El método requiere de una gran cantidad de simplificaciones para que el modelo a escala de la estructura represente con cierta certeza el comportamiento sísmico de la misma en el campo y se comporte de manera similar ante el patrón de cargas al que es sometido el espécimen.

Los patrones de carga utilizados para modelar la acción sísmica y que no alteran la respuesta esperada de la estructura, son la **carga monotónicamente creciente**, la cual se realiza mediante actuadores de carga o desplazamientos. **Ensayos sobre mesa vibradora** utilizando historias temporales de aceleración (Bonett Díaz, 2003).

A pesar que ambos ensayos son ampliamente utilizados y proporcionan resultados útiles, el realizado sobre la mesa vibradora refleja de manera más real la acción sísmica sobre la estructura (Bonett Díaz, 2003).

Por ejemplo, la investigación desarrollada por Chon y Soong (2000), es una de las investigaciones de vulnerabilidad para elementos no estructurales más recientes utilizando métodos experimentales sobre la mesa vibradora (Bonett Díaz, 2003).

b. Matrices de probabilidad de daño (MPD)

Las matrices de probabilidad de daño (MPD) relacionan el daño físico esperado en una estructura producida por un movimiento del suelo; expresa para cada tipo de instalación la probabilidad de tener cierto estado de daño medido en Escala de Mercalli Modificada (Juárez García, 2010).

Las MPD se dividen generalmente en siete columnas por cinco filas; en las primeras se determina el parámetro de medida para el movimiento del terreno, puede ser escala de Intensidad (MMI, MSK, etc.), aceleraciones pico del suelo, pseudodesplazamientos, entre otros.

Si como parámetro sísmico se selecciona la escala MMI se deberá tener un intervalo de intensidades desde VI hasta XII, ya que es cuando las estructuras son afectadas por los sismos, pag. 160 (Applied Technology Council, 1985).

Las filas representan el nivel de daño de una estructura, el cual se mide mediante intervalos de variación dados por una escala de daño la cual se divide en siete niveles, **sin daño, mínimo, ligero, moderado, pesado, mayor y destrucción** (Applied Technology Council, 1985).

Los estados de daño son determinados luego del levantamiento después de un sismo o por medio de la opinión de expertos para cada una de las tipologías estructurales que se tengan en el estudio.

El ATC propuso 91 MPD basadas en la opinión de expertos en las cuales las variaciones son la configuración estructural de puentes, edificaciones, túneles, instalaciones primarias, etc. (Applied Technology Council, 1985).

Un ejemplo de matriz de probabilidad de daño para edificaciones de mampostería reforzada de baja altura, para el estado de California, Estados Unidos se muestra en la Tabla 3-3. Donde se tiene desglosado como parámetro del sismo la escala de Mercalli Modificada y el factor de Daño Central en decimales.

Tabla 3-3 Matriz de Probabilidad de Daño para mampostería de baja altura. Fuente: ATC-13, MPD basada en la opinión de Expertos

CALIFORNIA								
RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	0.000	2.700						
0-1	0.005	65.800	10.000	1.000				
1 -10	0.050	31.500	89.700	88.000	34.500	3.500		
10 -30	0.200		0.700	11.000	63.400	76.200	17.500	3.700
30-60	0.450				2.100	20.300	74.500	68.300
60-100	0.800						8.000	28.000
100	1.000							
FDM		1.904	4.675	6.605	15.350	24.550	43.425	53.875

El factor de daño expresado en porcentaje, es la razón del costo monetario del daño producido por el sismo entre el valor de reemplazo total, Ecuación 3-5. El factor de daño central, se calcula como el promedio de los límites del Rango del Factor de Daño, Ecuación 3-6

Ecuación 3-5

$$FD = \frac{\text{Valor de la Pérdida (\$)}}{\text{Valor de reemplazo total de la estructura (\$)}}$$

$$FDC = \frac{FDj + FDi}{2}$$

Los porcentajes que están dentro de la matriz, representan la probabilidad que la estructura sufra daño con un FD determinado. Por ejemplo, de la Tabla 3-3, si se toma el valor correspondiente a la posición (3,3), la estructura de mampostería reforzada de baja altura en el estado de California, Estados Unidos, tiene un 94.9% de probabilidad de sufrir un daño ligero en un sismo de intensidad VIII.

Por último, para construir la curva de Factor de Daño Medio (FDM) vs Intensidad sísmica, los valores de la MPD se multiplican por cada FDC correspondiente en cada intensidad, para luego hacer una sumatoria que represente dicho FDM, Ecuación 3-7.

$$FDM = \sum (FDC * P_{daño})$$

Por ejemplo, si se cita la MPD de la Tabla 3-3, se tiene que para un sismo de intensidad VI el FDM es calculado como se muestra en la Figura 3-3 y Ecuación 3-8.

CALIFORNIA								
RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
		VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	0	2.7						
0-1	0.005	65.8	10	1				
1-10	0.05	31.5	89.7	88	34.5	3.5		
10-30	0.2		0.7	11	63.4	76.2	17.5	3.7
30-60	0.45				2.1	20.3	74.5	68.3
60-100	0.8						8	28
100	1							
FDM		1.904	4.675	6.605	15.35	24.55	43.425	53.875

Figura 3-3 Cálculo del Factor de Daño Medio

$$FDM = (0 * 2.7) + (0.005 * 65.8) + (0.05 * 31.5) + 0 = 1.904$$

Al graficar el FDM contra la escala de Intensidades, se tiene una curva donde se puede predecir el porcentaje de daño para cada intensidad en un escenario sísmico, Figura 3-4.

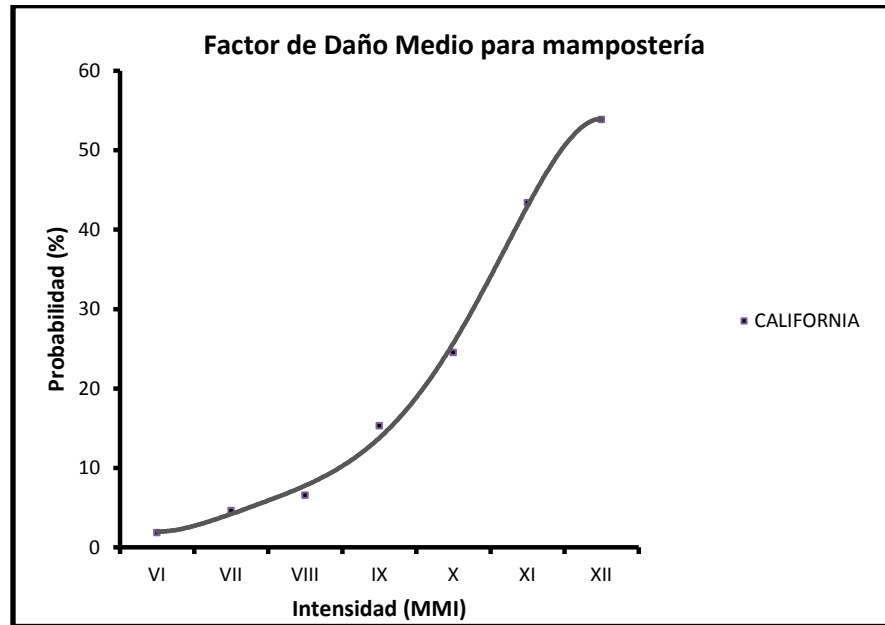


Figura 3-4 Curva de Factor de Daño Medio para mampostería en California, Estados Unidos.

3.5. Estudios de vulnerabilidad sísmica en El Salvador

Después de eventos sísmicos importantes en El Salvador como el del 10 de Octubre de 1986 (ver sección 2.2), se tuvo que realizar estudios de vulnerabilidad sísmica de diferentes tipologías de estructuras de acuerdo a su importancia, sin embargo, debido a conflictos internos del país estas investigaciones se pospusieron aproximadamente una década. Entre los estudios realizados en el país están:

Parker (1995) en el cual plantea un modelo de evaluación de vulnerabilidad para El Salvador en las estructuras dañadas por el terremoto del 10 de octubre de 1986. El

estudio se concentró en estructuras de vivienda y analizó las distribuciones habitacionales y populares en cada municipio de cada departamento mediante mapas de densidad habitacional y de población.

Guinea et al (1995) enfocó su estudio en las metodologías para la evaluación del riesgo sísmico con aplicación a instituciones educativas. Recopiló datos del sismo de 1986 en la capital del país, con lo que construyó funciones de pérdidas que relacionan la intensidad sísmica y el porcentaje de estructuras dañadas. Así mismo, se hizo una evaluación del riesgo por deslizamiento de tierra ocurridos como efectos de un terremoto, utilizó la metodología de Mora y Vahrson (1993) para Costa Rica.

Peña y Valdes (1997) propusieron una metodología para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica en El Salvador, aplicándose en centros educativos y en dependencias del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS).

Bommer et al (1998) caracterizó el riesgo sísmico en la región metropolitana de San Salvador, enfocó los cálculos en la probabilidad de una pérdida causada por un sismo, dependiendo de la amenaza y la vulnerabilidad sísmica, se basó en Fourier (1988). En el estudio se analizaron los eventos del 3 de mayo de 1965, 19 de junio de 1982 y 10 de octubre de 1986.

MARN (2012) es un estudio del área metropolitana de San Salvador (AMSS) en el que evalúa el riesgo sísmico enfocado a las dependencias de salud, educación y gobierno. El análisis de vulnerabilidad sísmica se realizó por medio de curvas de fragilidad basados en la plataforma CAPRA y generando curvas de capacidad por medio del sistema HAZUS.

Todos los trabajos realizados, a excepción de la investigación realizada por MARN 2012, se basan en el cálculo de la vulnerabilidad sísmica y riesgo por medio de la metodología propuesta por Soliman, Elanshai y Sobiath en 1990, la cual se basa en la observación de campo, donde se recopila la información de los efectos sufridos por las estructuras en todos los eventos.

Con la información recolectada en campo, se asignan calificaciones por medio de un factor propuesto, de igual forma califica los códigos sísmicos puntuando los rangos de los parámetros de diseño recomendados en éstos.

El objetivo de este método es evaluar la vulnerabilidad y riesgo de los edificios existentes, asignando valores numéricos que representen los parámetros que influyen en la respuesta sísmica de las estructuras, entre los que se tiene la configuración en planta, esbeltez, muros interiores que aporten rigidez a la estructura, mantenimiento, etc.

Por medio de la ponderación de estos parámetros, se obtiene un índice de vulnerabilidad sísmica que se encuentra en un rango determinado para indicar una baja o alta vulnerabilidad de la estructura.

Capítulo 4 Matrices de Probabilidad de Daños para la Zona Central y Paracentral de El Salvador

El procedimiento a seguir para la propuesta y determinación de las matrices de probabilidad de daños (MPD) para la zona estudiada es la detallada en los siguientes ítems:

- Determinar las tipologías estructurales de acuerdo a los materiales de construcción, y localización geográfica de la vivienda (zona urbana o rural).
- Analizar cada tipología estructural, en esta etapa se debe determinar la configuración de la planta arquitectónica de las viviendas en el cual se toma un prototipo y se generaliza como el común denominador de las estructuras.
- Cuantificar los porcentajes de viviendas vulnerables de acuerdo al tipo de material de construcción predominante en los muros de las viviendas, con lo que se plantean mapas de vulnerabilidad basados en este criterio.
- Analizar los datos estadísticos de los daños ocurridos en los últimos tres sismos importantes en El Salvador en las diferentes tipologías de viviendas fundamentados en los informes generados por las instituciones gubernamentales e internacionales.
- Investigar referencias de MPD utilizadas en países que tienen desarrollado este tema con pericia y con similitud en el peligro sísmico de la zona para tomar referencia de las mismas.
- Seleccionar los materiales con mayor presencia en el universo estudiado, y con los datos estadísticos y las referencias internacionales, plantear las matrices de probabilidad de daños para El Salvador para estos tres sistemas.

4.1. Reglamentación de El Salvador

De la Ley de Urbanismo y Construcción se obtuvo los parámetros para la zonificación sísmica de El Salvador, la cual se divide en dos partes, por una línea recta que inicia en San Antonio Pajonal, frontera con Guatemala hasta el río Goascorán, frontera con Honduras; dicha línea es paralela al Océano Pacífico, Figura 4-1.

En la zona I, se asigna un factor sísmico $A = 0.4$ indicativo de la aceleración pico esperada, para un periodo de recurrencia de 475 años y en la zona II, de $A = 0.3$ donde el periodo de recurrencia disminuye.

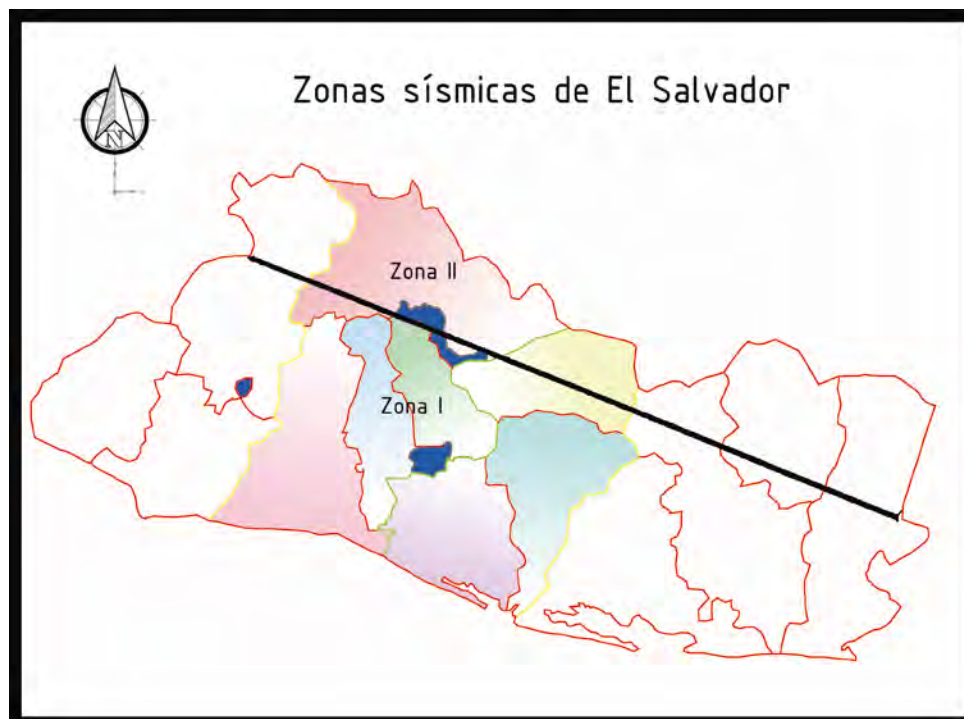


Figura 4-1 Zonificación sísmica de El Salvador

El espectro de diseño está definido en función de parámetros como la importancia de la estructura (I), zona sísmica en la que se encuentra (A), de la geología del sitio (Co), y del sistema estructural, sin embargo es de observar que la norma no establece ningún criterio especial para la consideración de alguna falla cercana, las cuales se desarrollan dentro de las ciudades, por ejemplo la falla existente en el centro de la capital San Salvador, que provocó desastres para el sismo de 1986.

En cuanto a la geología del terreno se divide en cuatro ítems como los mostrados en la Tabla 4-1, y asigna además tres niveles de importancia, Tabla 4-2 acorde al tipo y uso de la estructura en cuestión según la Tabla 4-3, la regularidad de una estructura está planteada desde dos perspectivas: Vertical y Horizontal; define como regular, todas aquellas que no tienen discontinuidades físicas significativas en su configuración vertical,

en planta o en sus sistemas resistentes a fuerzas laterales, (Ministerio de Obras Públicas, 1997), Tabla 4-3.

Tabla 4-1 Coeficientes de sitio de El Salvador

Tipo	Descripción	Co	To
S1	Perfiles de suelo:	2.50	0.30
	a) Materiales de apariencia rocosa caracterizados por velocidades de onda de corte mayores de 500 m/seg		
	b) Suelo con condiciones rígidas o muy densas, cuyo espesor sea menor de 30 m sobre el manto rocoso		
S2	Perfil de suelo:	2.75	0.50
	a) Suelo con condiciones rígidas o muy densas cuyo espesor sea de 30 m o más sobre el manto rocoso.		
	b) Suelo con condiciones compactas o muy compactas o mediante denso con espesor menor de 30 m		
S3	Perfil de suelo que contiene un espesor acumulado de 4 a 12 m de suelos cohesivos blandos a medianamente compactos o suelos no cohesivos sueltos.	3.00	0.60
S4	Perfil de suelo que contiene más de 12 m de suelo cohesivo blando o suelo no cohesivo suelto y caracterizado por una velocidad de onda de corte menor de 150 m/seg.	3.00	0.90

Tabla 4-2 Factores de importancia

Categoría de Ocupación		Factor de importancia (I)
I	Establecimientos esenciales o peligrosos	1.5
II	Edificios de ocupación especial	1.2
III	Edificios de ocupación normal	1

La regularidad de una estructura está planteada desde dos perspectivas: Vertical y Horizontal; define como Regular, todas aquellas que no tienen discontinuidades físicas significativas en su configuración vertical, en planta o en sus sistemas resistentes a fuerzas laterales, (Ministerio de Obras Públicas, 1997).

Tabla 4-3 Categorías de ocupación

Categorías de ocupación		Tipo de función de estructura de ocupación
I	Facilidades esenciales y de alto riesgo	Hospitales y otras facilidades médicas que tienen áreas de cirugía y tratamientos de emergencia; estaciones de bomberos y policía; tanques y otras estructuras que contienen, alojan o sostienen agua u otros materiales para combatir fuegos o equipo requerido para la protección de facilidades esenciales o de alto riesgo, o estructuras de ocupación especial; garajes o albergues para vehículos de emergencia y equipo; estructuras y equipo en centros de preparación para emergencias; equipo generador de energía en espera para facilidades esenciales; estructuras y equipo en centros de comunicación y otras facilidades requeridas para respuesta a emergencias, alojamiento de estructuras, que sostienen o contienen cantidades suficientes de sustancias tóxicas o explosivas que son peligrosas para la seguridad del público general si se liberan
II	Estructuras de ocupación especial	Estructuras cubiertas cuya ocupación primaria es asamblea pública - capacidad para más de 200 personas o más de 2000 m ² , los edificios para escuelas (hasta secundaria) o centros de cuidado durante el día - capacidad para más de 200 estudiantes; facilidades médicas no incluidas anteriormente; edificaciones de más de 4 pisos o más de 1000 m ² por piso; museos; monumentos; terminales de transporte; todas las estructuras de ocupación de más de 2000 personas; estructuras que albergan equipo muy costoso; bodegas de más de 10 m en altura o 500m ² por piso
III	Estructuras de ocupación normal	Todas las estructuras que tienen ocupaciones o funciones no listadas anteriormente.

Los pisos débiles no están permitidos por la norma, a menos que la estructura no tenga más de dos pisos ni sobrepase los 10 m de altura, categoría en la cual se incorporan las viviendas en estudio, ni por edificaciones en las que el entrepiso débil tenga una resistencia calculada menor que el 70% de la del entrepiso superior.

Las acciones sísmicas están regidas por la masa y la rigidez de las estructuras, para calcular estas acciones plantea, en el capítulo 4 y 5, dos métodos de análisis; el primero el método estático donde se define un espectro de respuesta elástico, una fuerza cortante basal calculada como la Ecuación 4-1.

Ecuación 4-1

$$V_b = C_s W$$

Donde W es el peso total de entrepiso y C_s es el coeficiente sísmico

Ecuación 4-2

$$C_s = \frac{AIC_o}{R} \left(\frac{T_o}{T} \right)^{2/3}$$

Donde A = factor de zona sísmica

I = factor de importancia

C_o = coeficiente de sitio

R = factor de modificación de la respuesta que depende del sistema estructural.

Ecuación 4-3

$$W = P_p + C_m + C_v$$

Donde P_p = peso propio de la estructura

C_m = Carga muerta

C_v = Carga viva máxima

Las condiciones de diseño están estructuradas para edificios de mediana y gran altura, donde la norma especifica los lineamientos de análisis estático, dinámico, las consideraciones de los efectos P- Δ , derivas de entrepiso, no linealidades de las estructuras, y demás aspectos. Sin embargo, en éste se excluye el apartado de edificios residenciales pequeños, donde se planteaba en el Reglamento de emergencia que surgió en 1989 luego del sismo de San Salvador 1986, una guía rápida para este tipo de edificios.

4.1.1. Norma técnica de diseño y construcción de viviendas

La norma técnica de diseño y construcción de viviendas consta de seis apartados, en el primero y segundo plantea las disposiciones generales y notaciones. El tercer apartado, es la exposición de las limitaciones de la norma, el cuarto establece la tipología de estructuras consideradas; el quinto y sexto los criterios de análisis, diseño y requisitos mínimos de la estructuración.

La norma especial es aplicable únicamente a las viviendas aisladas de uno o dos niveles, tanto en zonas rurales como urbanas y sistema estructural basado en muros de carga de mampostería o concreto (Ministerio de Obras Públicas, 1997).

La geometría de la vivienda debe ser rectangular cuya relación está limitada por la Ecuación 4-4 las alturas máximas como las planteadas en la Tabla 4-4, y el porcentaje de abertura no deberá de exceder el 20% del total del área de la planta.

Ecuación 4-4

$$\frac{L}{B} \leq 3.$$

Donde L = lado largo de la vivienda

B = lado corto de la vivienda.

Tabla 4-4 Altura máxima de viviendas

No Niveles	Altura máxima (m)
1	3.5
2	6.5

La tipología estructural que plantea la norma está basado en el sistema de piso y techo como se muestra en la Figura 4-2, donde generalmente el sistema predominante en viviendas de un piso es un diafragma flexible en el techo y para viviendas de dos pisos es el diafragma rígido en primer piso y estructura flexible en techo. Además una segunda clasificación basada en el tipo de muros de la viviendas como se muestra en la Figura 4-3.

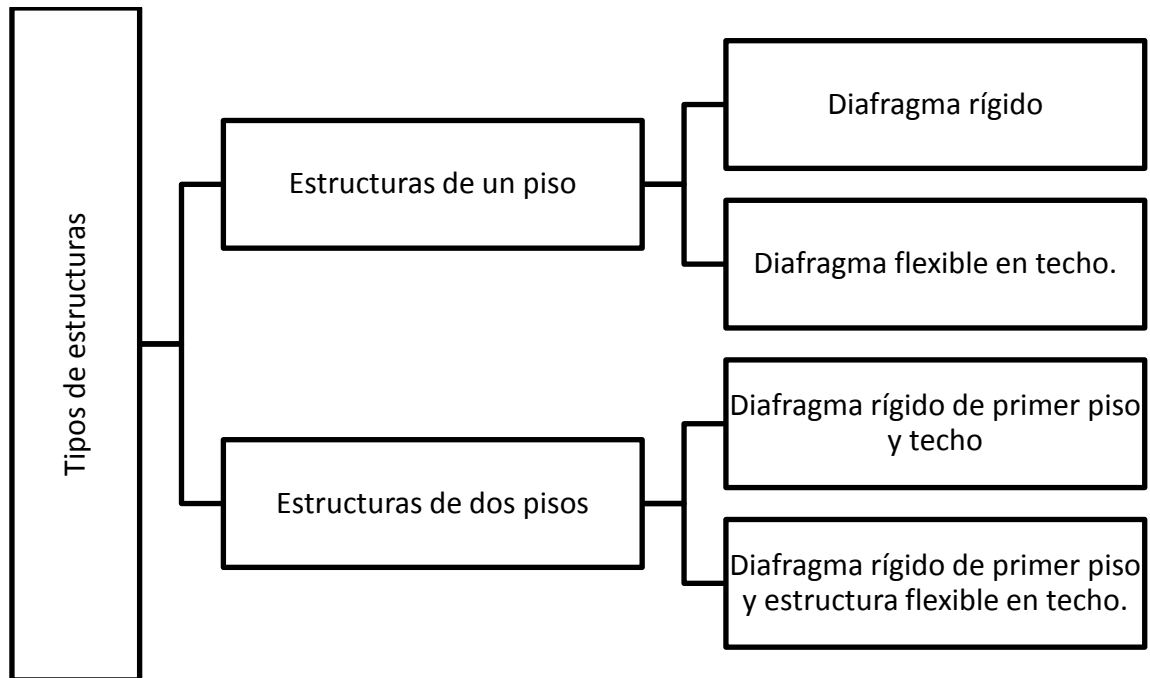


Figura 4-2 Tipos de estructuras según la Norma Especial, de acuerdo al tipo de sistema de piso y techo

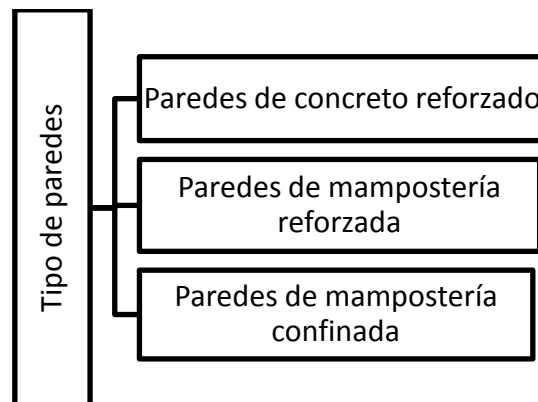


Figura 4-3 Tipología de paredes de acuerdo a la Norma especial para diseño y construcción de viviendas

La norma no establece los valores de las cargas de diseño, combinaciones de carga y cargas sísmicas, sino se remite al Reglamento, la normativa para la seguridad estructural y la norma de sismo, pero hace un apartado para especificar el coeficiente sísmico para las tipologías estructurales que contiene, Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Factor sísmico para viviendas de acuerdo al sistema de piso y techo

Zona Sísmica	Diafragma	Cs
I	Rígido	0.2
	Flexible	0.3
II	Rígido	0.15
	Flexible	0.22

En la sección 5.2 la norma plantea el método de análisis dependiendo de la estructuración que tenga la vivienda, haciendo una combinación de las sistemas de piso flexible y rígido tal como se muestra en la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Método de análisis dependiendo de la estructuración de la vivienda

Estructuración	Método de análisis
Un piso con techo flexible	Las paredes se analizan en base a sus áreas tributarias, como elementos individuales sometidos a fuerzas normales a su plano.
Uno o dos pisos con diafragma rígido en techo y piso	Las cargas se considerarán concentradas a nivel de cada uno de los diafragmas rígidos.
Estructuras de dos pisos con diafragma rígido en el primer piso y flexible en el techo	Se considerarán con una sola carga concentrada a nivel del diafragma rígido del primer piso, excepto que las paredes del segundo piso se diseñaran en base a sus cargas tributarias.

En cuanto a la mampostería la norma se limita a dar especificaciones generales de resistencia de las piezas sin brindar criterios de pruebas de campo ni laboratorio a realizar para tener controles de calidad de los lotes a utilizar en la construcción.

Por último en el capítulo 6, la norma plantea los criterios de diseño mínimos para la mampostería confinada y reforzada, así como también la cimentación propuesta

mínima para una vivienda, a continuación se mencionan algunos de los requerimientos (Ministerio de Obras Públicas, 1997):

- Espesor de las paredes debe ser igual o mayor de 10 cm para viviendas de un nivel y 15 cm para dos niveles.
- La relación máxima de altura sin soporte lateral a espesor será de 20.
- La suma de las áreas del refuerzo vertical y horizontal debe ser por lo menos 0.0013 veces el área bruta de la pared.
- El espaciamiento máximo del refuerzo vertical será 6 veces el espesor del muro (t) u 80 cm, la dimensión que sea menor.
- El diámetro mínimo del refuerzo vertical será de 8 mm y del refuerzo horizontal 6.4mm.
- Todas las paredes deben llevar dadas ya sea horizontales o inclinadas en el borde superior de 20 cm de altura y el espesor de la pared como mínimo reforzada como mínimo con 2#3 y grapas #2@20 cm.
- Si la mampostería reforzada todas las celdas adyacentes a huecos de puertas y ventanas deben estar reforzadas con una varilla corrugada #3.
- Todos los cargaderos de puertas deben ser de concreto reforzado o una dala de bloque diseñados para soportar carga lateral.

4.1.2. Folleto complementario Adobe

Este documento es un apéndice que forma parte de la norma especial para el diseño y construcción de vivienda y está presentado como un paquete de recomendaciones que sirvan de guía para mejorar el comportamiento sísmico del sistema constructivo (Ministerio de Obras Públicas, 1997).

En condiciones sísmicas, el folleto recomienda:

- La altura de las paredes de $H_{\max} = 3.0$ m y $H_{\min} = 2.0$ m

- Espesor recomendado de los muros

Ecuación 4-5

$$e \geq 1/8H$$

$$e_{min} = 30cm$$

- Distancia entre apoyos laterales o contrafuertes debe ser menor a 10 veces su espesor.

Ecuación 4-6

$$L_{max} \leq 10t_{muro}$$

- La distancia entre vanos debe ser como mínima 1.20m.
- Ancho máximo de vanos = 1.20m
- La sumatoria del área de vanos debe ser igual o menor al 30% del área total de pared entre apoyos.
- Uso de techo liviano preferiblemente a 4 aguas.

El cálculo de la cortante basal (V_b) se realiza con la ecuación proveniente del método estático $V_b = C_s W$ en donde el Coeficiente sísmico se tomará como se muestra en la Tabla 4-7. Este valor debe calcularse para cada muro independientemente de acuerdo al peso de cada uno de ellos.

Tabla 4-7 Coeficientes sísmicos para el adobe

Zona Sísmica	C_s
I	0.5
II	0.4

El esfuerzo cortante resistente del muro puede tomarse con un valor de 0.25 kg/cm², el cual debe ser menor al cociente de V_b entre la sumatoria de las áreas efectivas de los muros.

Además de estos sencillos parámetros sugeridos por el apéndice, éste contiene ayudas visuales que son de fácil comprensión para la guía de la construcción de la vivienda de adobe; este inicia desde la selección del material, pruebas empíricas que se pueden realizar a la mezcla sin tener que incurrir en muchos recursos, la fabricación del adobe, las cimentaciones, y forma de colocación del mismo.

4.2. Tipologías estructurales de la vivienda común.

Para en el desarrollo la investigación se usa la información disponible al público en la página web de la Dirección General de Estadísticas y Censos (DIGESTyC) con el fin de caracterizar de las viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2007). Para esto se incluye factores como material de paredes, altura de la edificación, sistema de piso, localización geográfica de la vivienda (zona urbana o rural), entre otros, sin embargo, características como la cimentación de la estructura es imposible incluirla pues no se cuenta con la información adecuada.

En El Salvador tradicionalmente se construye la vivienda unifamiliar de uno o dos niveles con los materiales que se detallan a continuación:

- Sistema mixto
- Adobe
- Bahareque
- Madera
- Lámina Metálica
- Palma, paja o vegetal
- Desecho
- Otro

De acuerdo a los resultados de las tabulaciones de los datos del censo, el material de construcción más utilizado para erigir las viviendas comunes en El Salvador es la mampostería tanto de bloque de concreto como el tabique rojo con un 71%, Figura 4-4.

En segundo lugar, está el adobe con el 15% de viviendas que a pesar de muchos colapsos en sismos pasados, aún hay una gran cantidad de viviendas de este tipo. Los demás materiales dominantes en el país son el bahareque, la madera, la lámina metálica, los desechos y como minoría otros materiales que son utilizados para la construcción.

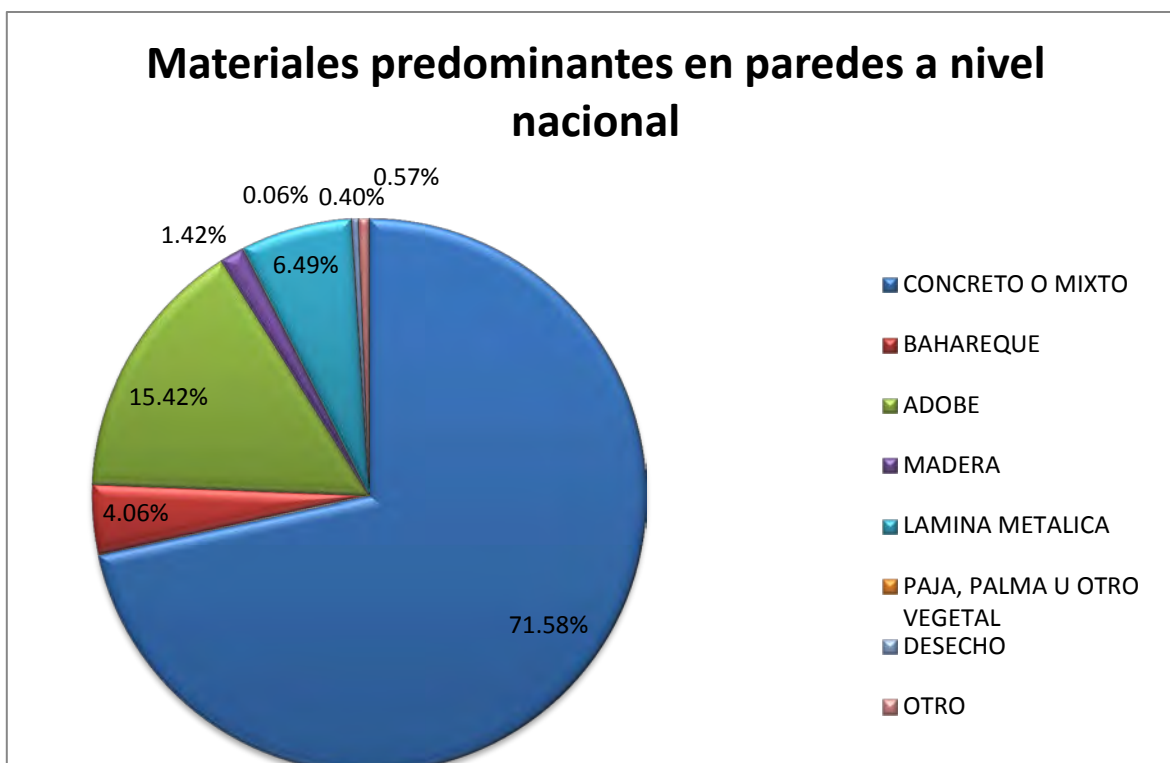


Figura 4-4 Materiales de construcción utilizados en El Salvador

En la Figura 4-5, se muestra el proceso de construcción de muros de mampostería, en este caso, bloque de concreto con dos agujeros, en los cuales se ha colocado refuerzo vertical correspondiente a varilla corrugada, (es decir un diámetro no menor a 3/8”), a cada 40 cm. Los ductos colocados en el interior de los huecos sin que se dañe el ladrillo.



Figura 4-5 Construcción de bloque de concreto reforzado, El Salvador

La Tabla 4-8 muestra el análisis estadístico de las viviendas en la zona de estudio, cabe destacar que la mayoría de viviendas son construcciones de baja altura donde predominan las viviendas unifamiliares de uno o dos niveles, es decir, comúnmente no sobrepasan los 6 m.

Además de la altura de las viviendas, se puede observar que los materiales de construcción típicos de las viviendas son 7, mampostería reforzada y/o confinada, el adobe, bahareque, madera, lámina metálica, palma, paja o vegetal y desechos.

Si bien es evidente que el material con mayor presencia en la construcción de viviendas es la mampostería adecuada y resistente al sismo (mampostería reforzada y/o confinada), materiales como el adobe y el bahareque no representan una minoría despreciable en cuanto a número de viviendas, lo cual se puede definir como un fenómeno socioeconómico de la población. Es decir, dependiendo de las costumbres, la economía y las necesidades que provoca el entorno, así es adoptado cada sistema constructivo.

Tabla 4-8 Inventario de viviendas en El Salvador

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	%
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	89,692	1	89,692	9.42%
Bahareque	27,821	1	27,821	2.92%
Madera	4,017	1	4,017	0.42%
Lámina metálica	52,525	1	52,525	5.52%
Palma, paja o vegetal	1,406	1	1,406	0.15%
Desecho	1,982	1	1,982	0.21%
Otro	4,164	1	4,164	0.44%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	770,117	1	568,989	59.79%
		2	201,128	21.13%
T O T A L	951,724			

Las tendencias son similares al delimitar el estudio a las Zonas Central y Paracentral, la mampostería vuelve a dominar y ser mayoría, sin embargo se eleva a casi el 81%, el adobe 9.5% y la lámina metálica el 5.5%.

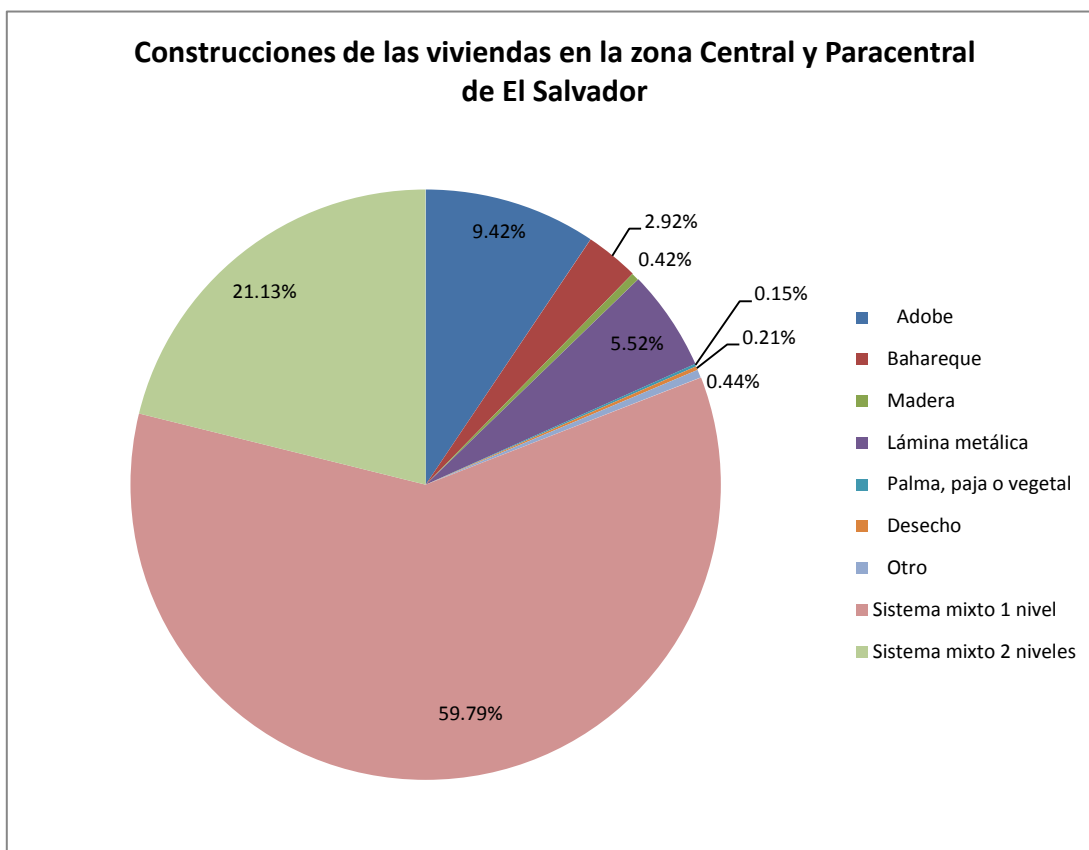


Figura 4-6 Construcción de las viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

4.2.1. Materiales de construcción utilizados en la vivienda común por departamento

a. Chalatenango

El departamento de Chalatenango se encuentra ubicado al Norte de la Zona Central de El Salvador, con un área territorial de 2,016.58 Km² (Chalatenango, 2010-2013), es el departamento con menor densidad poblacional en el país. El departamento está dividido en 33 municipios cuyas economías se basan en producción artesanal y algunos otros en turismo.

La Tabla 4-9 muestra que la vivienda en Chalatenango está regida por tres materiales de construcción que representan el 98% del total de inventario; estos materiales son: Mampostería, Adobe y Bahareque.

Tabla 4-9 Vivienda en Chalatenango

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	27,066	1	27,066	47.92%
Bahareque	654	1	654	1.16%
Madera	317	1	317	0.56%
Lámina metálica	272	1	272	0.48%
Palma, paja o vegetal	49	1	49	0.09%
Desecho	62	1	62	0.11%
Otro	277	1	277	0.49%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	27,786	1	22,976	40.68%
		2	4,810	8.52%
T O T A L	56,483			

Como se observa en la Figura 4-7, la mampostería y el adobe tienen un porcentaje mayoritario, entre ambos tienen aproximadamente el 95% el resto.

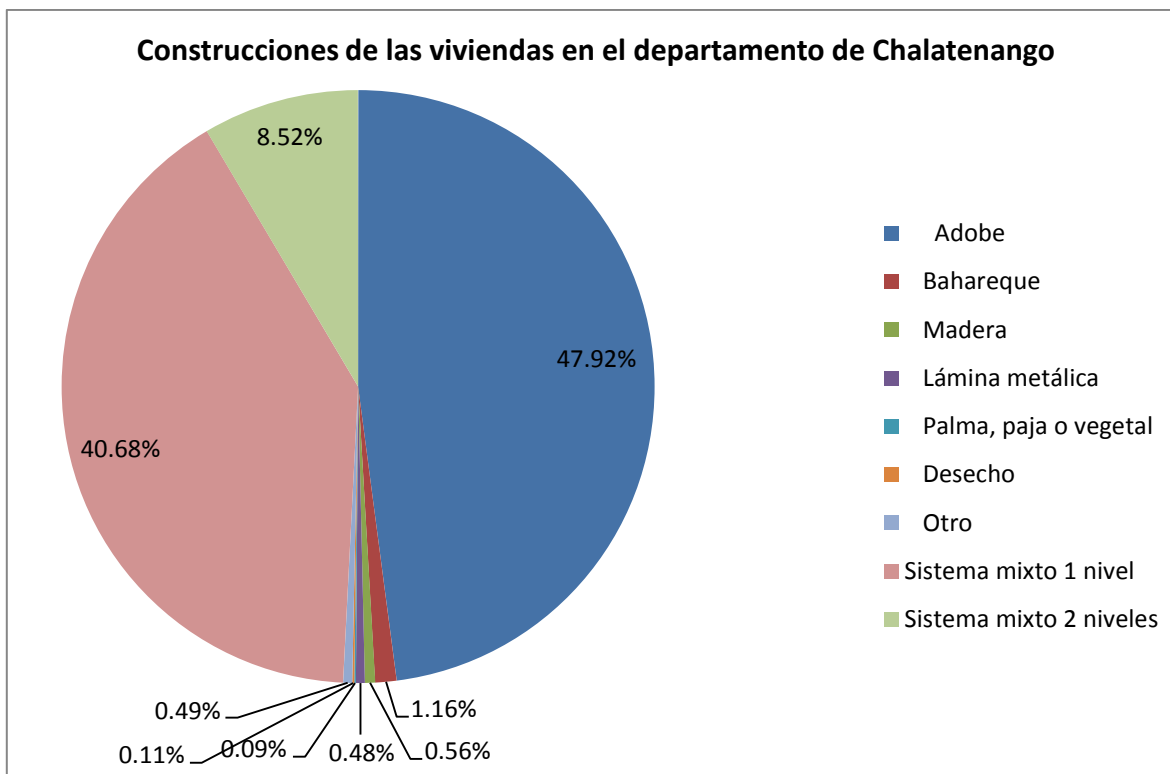


Figura 4-7 Viviendas en Chalatenango

b. La Libertad

El departamento de La Libertad se encuentra en la Zona Central de El Salvador, colindando San Salvador, tiene una extensión territorial de 112 km² en los cuales alberga a casi 122,000 habitantes. La cabecera departamental es Santa Tecla, la cual fue por algún tiempo capital del país.

La economía se diversifica grandemente en el departamento, pues en este se desarrolla la industria, agricultura, pesca, turismo, entre otras actividades, por lo cual, la tipología de la vivienda es de similar manera diversa.

La Libertad se encuentra en la zona sísmica I del país, lo que coloca al departamento en la zona de mayor peligro sísmico del país. En este departamento se encuentra varios puntos de deslizamientos, por ejemplo, la carretera de “Los Chorros”

(CA-1) en la que frecuentemente se dan deslaves y desprendimientos de tierra, los cuales se incrementan cuando ocurren sismos.

En la Tabla 4-10 se observa como predomina el sistema mixto en la construcción de la vivienda pues es el 79% del total de viviendas, seguido del adobe con aproximadamente el 8%. Este fenómeno es de suponerse pues municipios como Antiguo Cuscatlán, Santa Tecla, entre otros forman parte del desarrollo de la capital.

Tabla 4-10 Viviendas en La Libertad

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	16,025	1	16,025	8.21%
Bahareque	5,627	1	5,627	2.88%
Madera	1,600	1	1,600	0.82%
Lámina metálica	14,876	1	14,876	7.62%
Palma, paja o vegetal	290	1	290	0.15%
Desecho	536	1	536	0.27%
Otro	1,288	1	1,288	0.66%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	154,968	1	132,918	68.09%
		2	22,050	11.30%
T O T A L	195,211			100.00%

Cabe mencionar que la madera por ejemplo, se reduce grandemente en comparación con Chalatenango, pues este es un departamento en el cual la madera no representa un material de construcción barato.

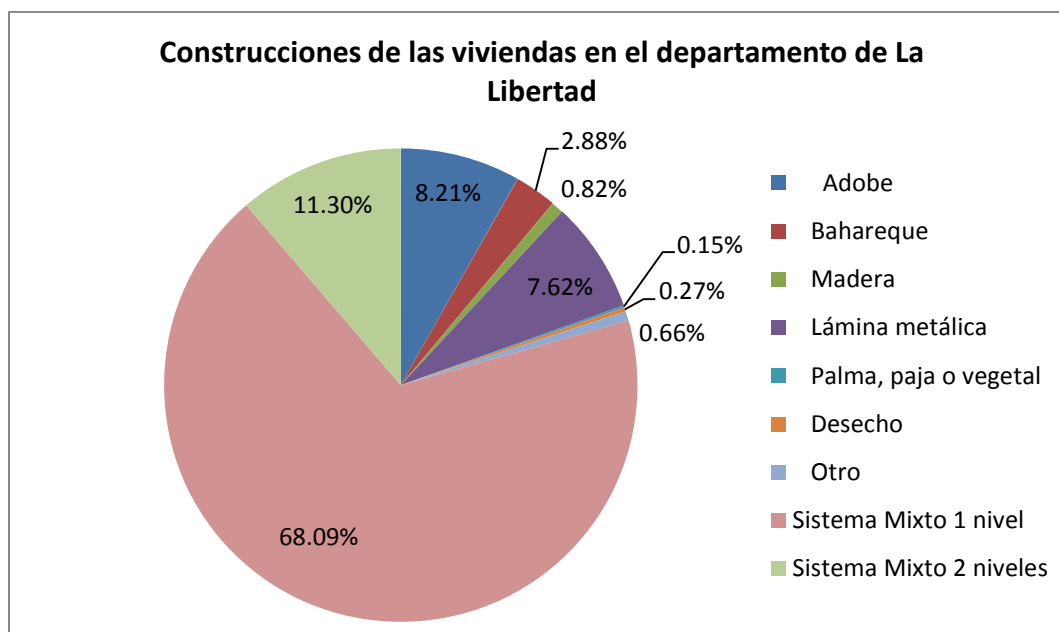


Figura 4-8 Construcción de vivienda en La Libertad

La Figura 4-8 muestra que en La Libertad es predominante la construcción de viviendas de un solo nivel y que las condiciones sísmicas del lugar obliga a los habitantes a cambiar los sistemas constructivos.

c. San Salvador

Departamento ubicado en la Zona Central de El Salvador, tiene una extensión territorial de 886 km² aproximadamente y es el departamento con mayor densidad poblacional del país.

San Salvador está ubicado en la región sísmica I y frecuentemente muchas de las ciudades que se desarrollan en este departamento han sido destruidas por los fuertes terremotos.

San Salvador se divide en 19 municipios, de los cuales 11 forman parte del Área Metropolitana de San Salvador, complejo urbano que alberga el desarrollo capitalino de El Salvador.

De la Tabla 4-11 se concluye que la población sustituyó el adobe y bahareque casi en su totalidad, sin embargo a pesar que el porcentaje de este material es bajo, la cantidad de viviendas aún sigue siendo alta pues representa 12,000 familias en viviendas vulnerables. Además, viviendas de lámina metálica representan un porcentaje importante en de viviendas lo que denota dos aspectos, el primero que hay mucha vivienda de lámina metálica y adobe en el centro histórico de San Salvador y segundo la pobreza de la población.

Tabla 4-11 Viviendas en el departamento de San Salvador

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	11,228	1	11,228	2.41%
Bahareque	7,173	1	7,173	1.54%
Madera	652	1	652	0.14%
Lámina metálica	17,694	1	17,694	3.79%
Palma, paja o vegetal	130	1	130	0.03%
Desecho	432	1	432	0.09%
Otro	1,174	1	1,174	0.25%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	428,236	1	325,408	69.72%
		2	102,828	22.03%
T O T A L	466,718			100.00%

En la Figura 4-9, se observa que el uso del sistema mixto es el predominante en la construcción de viviendas en San Salvador pues tiene el 92% de vivienda construida de esta manera, seguido del adobe con el 2% y el bahareque con el 1.5%

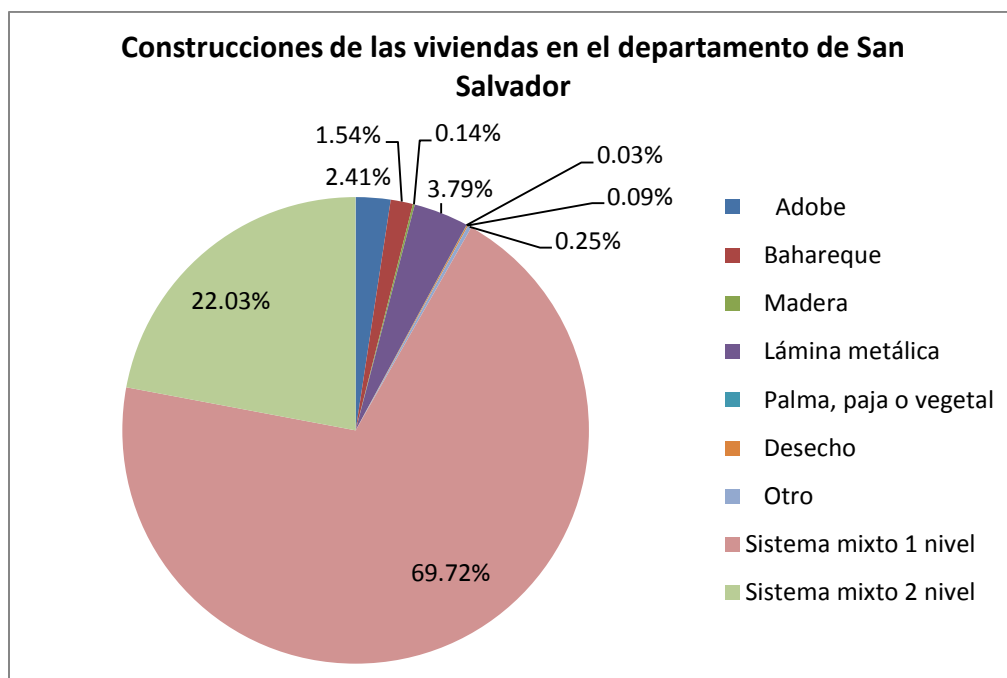


Figura 4-9 Viviendas en San Salvador

d. La Paz

El departamento de La Paz está ubicado en la Zona Paracentral, colindante con la costa del Océano Pacífico. En este departamento se han suscitado varios epicentros de sismos locales, los cuales generalmente se producen a poca profundidad.

De acuerdo a la Tabla 4-12 en La Paz, se tiene 67,645 viviendas construidas con mampostería reforzada y/o confinada, de las cuales construcciones de un nivel son las de mayor existencia. El adobe y bahareque como es de esperarse por la sismicidad del lugar es menor cantidad, sin embargo, el porcentaje comparado con San Salvador, es mucho mayor.

La Figura 4-10 muestra de similar forma que a nivel nacional, la mampostería es el principal material de construcción del departamento con una diferencia de importante magnitud con respecto al porcentaje del adobe y el bahareque. Asimismo, la lámina metálica es el segundo material de construcción más utilizado en el departamento de La Paz con un total de 10% de viviendas existentes.

Tabla 4-12 Viviendas en el departamento de La Paz

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	8,302	1	8,302	9.06%
Bahareque	3,987	1	3,987	4.35%
Madera	932	1	932	1.02%
Lámina metálica	9,295	1	9,295	10.14%
Palma, paja o vegetal	558	1	558	0.61%
Desecho	259	1	259	0.28%
Otro	643	1	643	0.70%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	67,645	1	60,531	66.07%
		2	7114	7.76%
T O T A L	91,622			100.00%

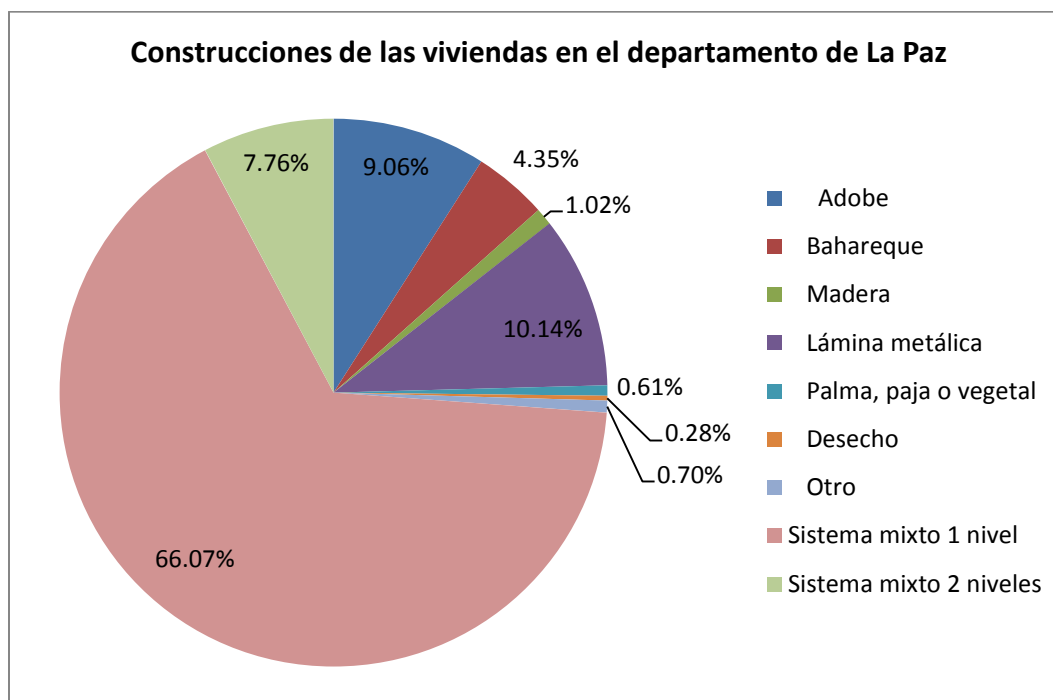


Figura 4-10 Viviendas en La Paz

e. Cuscatlán

Departamento que forma parte de la Zona Central de El Salvador y parte de su territorio es colindante con la zona sísmica II. Pocos sismos de importante magnitud se han desarrollado en el departamento de Cuscatlán, lo cual se puede observar en la Figura 4-11, pues es el porcentaje de viviendas de adobe y bahareque aumenta sustancialmente en comparación con otros departamentos.

A pesar que la mampostería es el material de construcción de mayor utilización en Cuscatlán, de la Tabla 4-13 se puede decir que hay una vivienda de adobe por cada 3 de mampostería, lo que representa un alto porcentaje de vivienda vulnerable en el departamento de Cuscatlán.

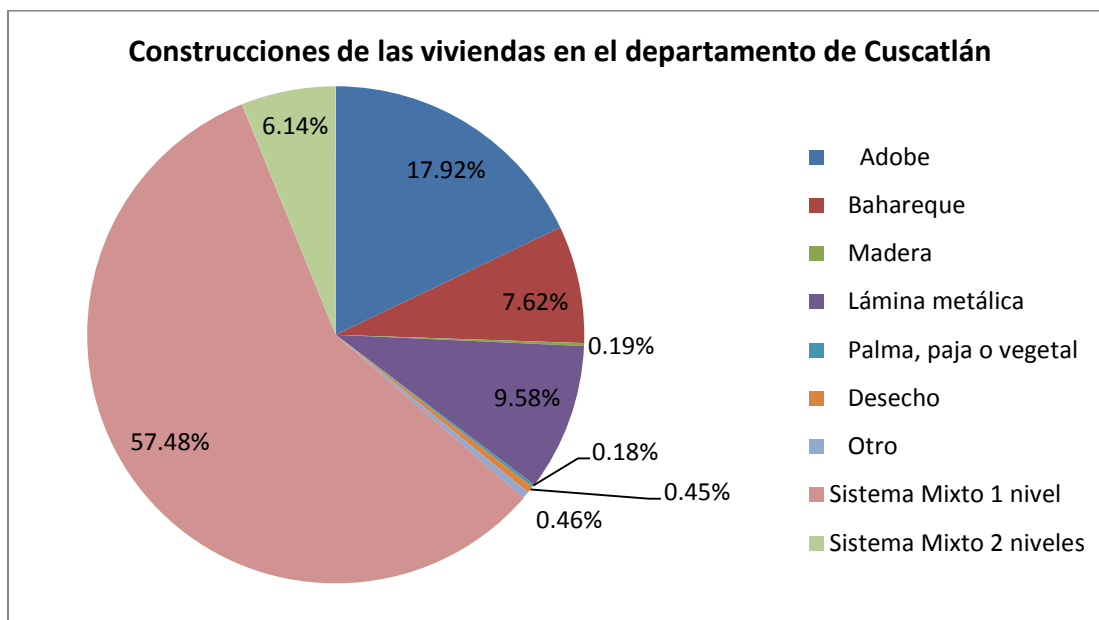


Figura 4-11 Viviendas en Cuscatlán

Tabla 4-13 Viviendas en el departamento de Cuscatlán

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	10,542	1	10,542	17.92%
Bahareque	4,480	1	4,480	7.62%
Madera	110	1	110	0.19%
Lámina metálica	5,635	1	5,635	9.58%
Palma, paja o vegetal	105	1	105	0.18%
Desecho	263	1	263	0.45%
Otro	269	1	269	0.46%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	37,430	1	33,819	57.48%
		2	3,610	6.14%
T O T A L	58,834			100.00%

f. Cabañas

Departamento ubicado en el norte de la Zona Paracentral cuya extensión territorial abarca 1,100 km². Por su ubicación, de similar forma que en Cuscatlán, los sismos ocurridos en el territorio son de baja intensidad lo que se refleja en los materiales de construcción, Figura 4-12.

El número de viviendas vulnerables en el departamento de Cabañas es del 30% entre viviendas de adobe, bahareque, lámina metálica, entre otros, que representa un número importante de personas y de posibles damnificados cuando suceda un evento sísmico, Tabla 4-14.

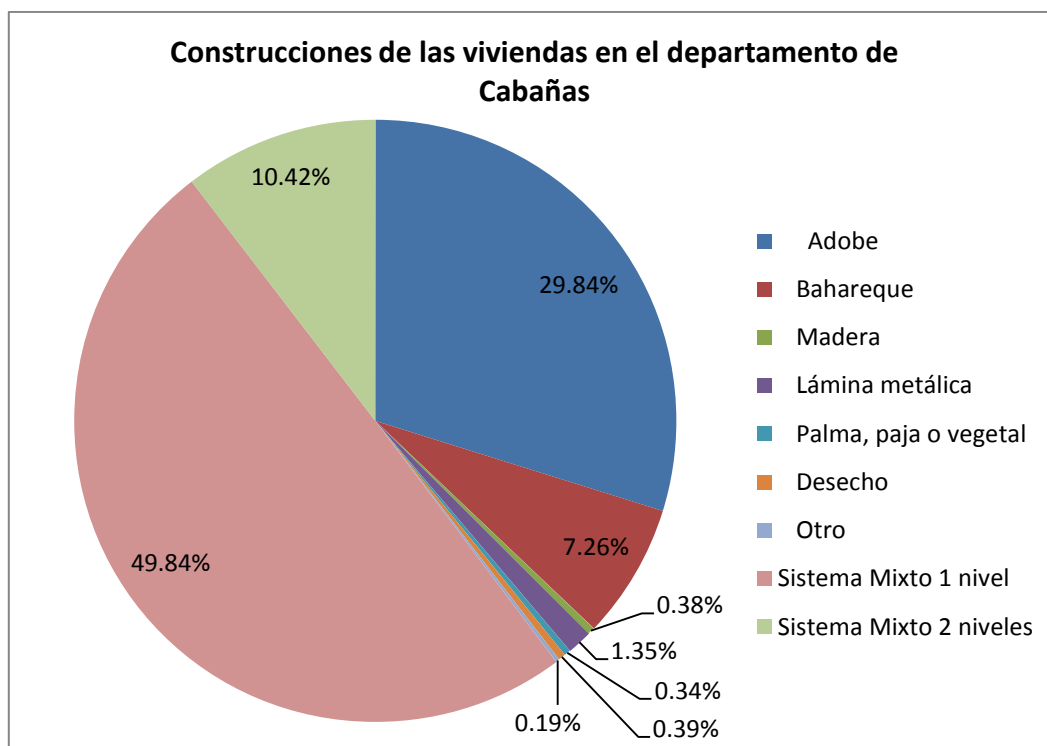


Figura 4-12 Viviendas en Cabañas

Tabla 4-14 Viviendas en el departamento de Cabañas

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	11,247	1	11,247	29.84%
Bahareque	2,737	1	2,737	7.26%
Madera	143	1	143	0.38%
Lámina metálica	508	1	508	1.35%
Palma, paja o vegetal	129	1	129	0.34%
Desecho	146	1	146	0.39%
Otro	73	1	73	0.19%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	22,714	1	18,786	49.84%
		2	3,928	10.42%
T O T A L	37,697			100.00%

g. San Vicente

Departamento ubicado en la Zona Paracentral de El Salvador con una extensión territorial de casi 1,200 km², en el que se han originado innumerables sismos locales de magnitud importante.

El material de construcción más utilizado es la mampostería reforzada y/o confinada, el segundo material es el adobe seguido de la lámina metálica, Tabla 4-15. A pesar que en el último sismo importante, 13 de febrero de 2001 muchos de los municipios de San Vicente fueron destruidos, los porcentajes de viviendas de materiales vulnerables son altos.

Tabla 4-15 Vivienda en el departamento de San Vicente

Tipo de Construcción	Cantidad	Clasificación por niveles		
		No. De niveles	Cantidad	Porcentaje (%)
1. Construcciones sin estructura sismorresistente				
Adobe	5,282	1	5,282	11.70%
Bahareque	3,163	1	3,163	7.00%
Madera	263	1	263	0.58%
Lámina metálica	4,244	1	4,244	9.40%
Palma, paja o vegetal	144	1	144	0.32%
Desecho	283	1	283	0.63%
Otro	441	1	441	0.98%
2. Construcciones con estructura sismorresistente				
Mampostería reforzada				
Sistema mixto (nervios y soleras)	31,339	1	27,968	61.93%
		2	3,371	7.46%
T O T A L	45,159			100.00%

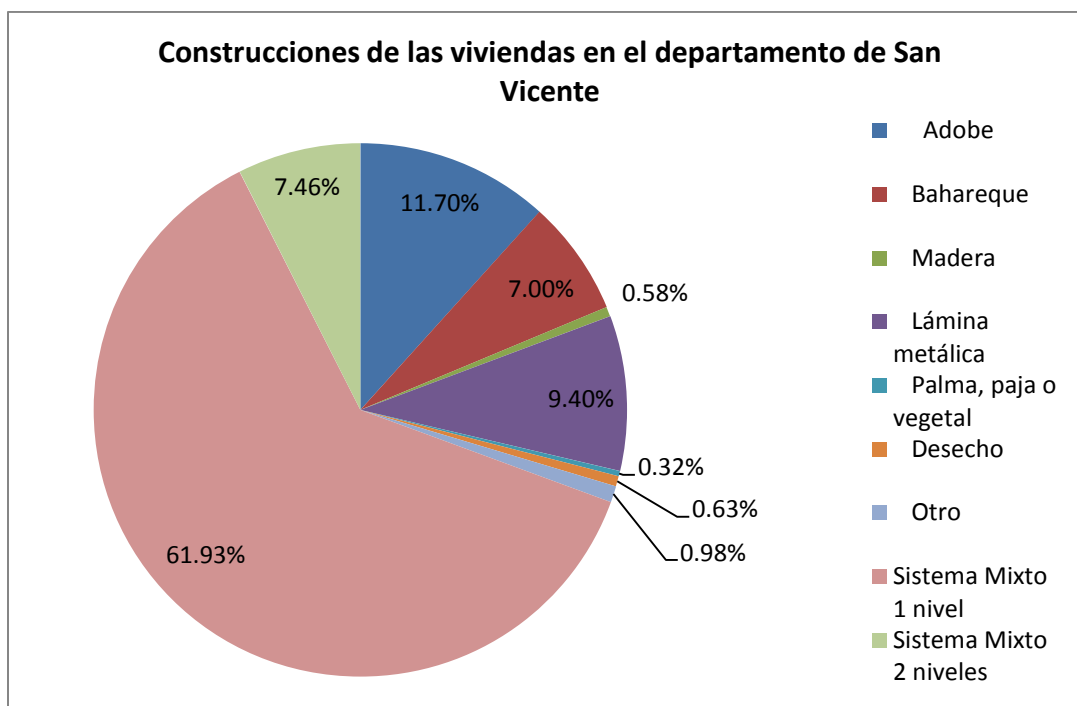


Figura 4-13 Vivenda en San Vicente

4.3. Caracterización de la vivienda común en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

La mampostería de El Salvador, se es de dos tipos, reforzada interiormente cuando se utiliza el bloque de concreto en los cuales se coloca refuerzo vertical y horizontal; además, la mampostería confinada por medio de castillos y dalas, cuando se utiliza el tabique rojo, de acuerdo con la Norma Especial para Diseño y Construcción de viviendas en El Salvador.

La mampostería es un sistema constructivo de bajo costo, el cual puede ser utilizado para viviendas como edificios pequeños de baja altura, con el cuidado de proporcionar un adecuado confinamiento y refuerzo en huecos para evitar esfuerzos de tensión que la mampostería es incapaz de soportar.

La construcción formal está delimitada por las normas técnicas, pues deben cumplir con los requerimientos mínimos para la construcción de viviendas de mampostería, que incluye el correcto confinamiento de los huecos de los muros, refuerzo,

espaciamiento, sin embargo, empresas trabajan con materiales de poca calidad que disminuye la capacidad de la estructura.

Por otro lado, la autoconstrucción guiada generalmente por albañiles o maestros de obra, es construida sobredimensionada con elementos robustos que rigidizan extremadamente la estructura, lo cual también afecta el desempeño sísmico de la misma.

En esta investigación, se nombrará como construcción formal a toda aquella que cumpla con las especificaciones y condiciones de las Normas Especiales para Diseño y Construcción de Viviendas de El Salvador, además que cuenten con el criterio de un profesionalista capaz de aplicar dichos lineamientos.

Construcción informal o autoconstrucción, será toda aquella que infrinja la normativa mencionada, además que es diseñada, desarrollada y ejecutada por personas no capacitadas con conocimiento técnico del área.

Por otro lado, en la práctica profesional se ha podido comprobar que a pesar de la heterogeneidad en los procesos de producción de los mampuestos, especialmente el tabique rojo que se elabora de manera artesanal, en los eventos sísmicos más recientes tuvo un desempeño aceptable.

Con respecto al adobe, de acuerdo al proceso constructivo practicado en El Salvador hasta los últimos eventos de 2001, mostró un mal comportamiento a las demandas y las solicitaciones del terreno, Tabla 4-16 (Comisión Económica para América Latina y El Caribe, 2001) .

El bahareque tuvo un desempeño aceptable en el sismo de 1965 y la reconstrucción de la vivienda marginal se realizó con este material (Meli & Avila, 1987), sin embargo, en el sismo ocurrido en febrero de 2001, la mayoría de las viviendas colapsadas fueron de adobe en la Zona Paracentral de El Salvador, lo que demostró que la técnica adecuada y la calidad de la materia prima con la que se manufactura el adobe son inadecuadas. A pesar de ello, la población sigue reconstruyendo sus viviendas con este material, fenómeno en el que están implícitos factores sociales, económicos y culturales.

Tabla 4-16 Daños en las viviendas por el sismo de 2001, Fuente: Adaptación de CEPAL, sobre la base suministrada por el Comité de Emergencias Nacionales (COEN) y la Encuesta de Hogares de Propósito Múltiple para el año 1999 de DIGESTYC.

Tipología de paredes de las viviendas afectadas por departamentos (%)					
Departamento	Viviendas afectadas	Bahareque	Adobe	Concreto	Otros
San Vicente	69	17	50	25	6
La Paz	64	12	45	33	8
La Libertad	24	13	20	58	7
Cuscatlán	22	14	45	35	4
San Salvador	3	7	5	80	6
Cabañas	2	16	51	25	6
Chalatenango	0	5	69	22	2

Por lo que de acuerdo a todos estos factores, estadísticas y criterios, se ha caracterizado la vivienda de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, resumiendo cinco tipologías que rigen la construcción de viviendas.

Tipología I Concreto o mixto:

Viviendas de mampostería de tabiques recocidos (mampostería confinada) o bloque hueco de concreto (mampostería reforzada). La cimentación consta de zapatas corridas generalmente de piedra o concreto reforzado, los cuales generalmente no sobrepasan un desplante de 1m.

El sistema de techos está conformado por polines metálicos, espaciales o tipo C, espaciados a no más de 95 cm de eje a eje entre ellos. La cubierta de es un diafragma flexible de lámina metálica o fibro-cemento, colocadas comúnmente a dos aguas.

Como es la generalidad, las viviendas son unifamiliares de baja altura, es decir que no pasan de dos niveles (6 m).

Tipología II Adobe:

Zona urbana: viviendas antiguas de un nivel generalmente con techos altos y con patios centrales que indica una distribución geométrica rectangular muy regular. Estas

estructuras están ubicadas en los centros históricos de las ciudades, pues datan de épocas de la colonia.

Zona rural: viviendas rectangulares con pocos huecos, y pocos muros intermedios que aporten rigidez a los más largos. La cimentación se construye de mampostería de piedra de grandes dimensiones que soporten el peso de las gruesas paredes de aproximadamente 40 cm de espesor.

En ambas zonas el sistema de techos está conformado por un entramado de vigas de madera en ambos sentidos y con una cuadrícula secundaria para sostener la teja que constituye la cubierta, esto forma un diafragma flexible que no aporta rigidez a los muros laterales.

Tipología III Bahareque

El bahareque principalmente se desarrolla en la vivienda común de las zonas rurales, cuya planta es rectangular alargada, carente de muros interiores que aporten rigidez a los muros largos que provocan que puedan ocurrir deformaciones fuera del plano. Pocos huecos existentes en las paredes, en su mayoría un hueco de puerta y dos ventanas.

La estructura de techo es similar a la construcción con adobe y la altura del mismo no sobrepasa los 3 m. La cimentación comúnmente es con suelo estabilizado o bien mampostería de piedra.

Tipología IV Madera

Viviendas generalmente ubicadas en zonas montañosas y rurales. La planta es rectangular, donde son muy pocas las divisiones internas que den rigidez lateral a la estructura. Sistema estructural muy liviano y flexible.

El techo está sustentado en elementos primarios, cuarterones de madera y secundarios, costaneras y reglas. Cuando son viviendas con más refinamiento en su

material de construcción, se trata de tablas puestas de canto sujetas a cuartones que hacen la función de castillos.

La cimentación se realiza por medio de concreto ciclópeo simulando un empotramiento en el suelo de los castillos para luego, iniciar la colocación de las tablas sujeta a un cuartón colocado de lazo que sirve de apoyo de las paredes.

Tipología V Lámina Metálica, Paja, palma o vegetales, Desechos

Viviendas de escasos recursos, generalmente ubicadas en zonas de alto riesgo, por deslizamientos, desbordes de ríos, entre otros. Son viviendas con planta rectangular y un sistema muy flexible. En el sistema de techo predomina la lámina el cual su aporte a la rigidización es mínimo. En estos casos, difícilmente el sistema de sustentación de la estructura de techo es elaborada, sino más bien está hecho con los mismos materiales de desecho.

4.4. Vulnerabilidad sísmica por materiales de construcción

En el estudio preliminar se incluyó el análisis de la vulnerabilidad sísmica enfocada en los materiales de construcción utilizados en las viviendas, agrupándose en cinco tipologías estructurales que se describen en la Sección 4.2 y Sección 4.3

La vivienda construida con el sistema mixto o concreto demostró tener un comportamiento aceptable, de acuerdo con el desempeño observado en los últimos sismos importantes ocurridos en El Salvador. (Comisión Económica para América Latina y El Caribe, 2001).

El adobe y bahareque por el contrario, en los sismos de 2001, sus desempeños fueron malos, ya que produjeron la mayor cantidad de colapsos, por la poca capacidad sismorresistente de los sistemas, además de factores de entorno, de intemperismo de las viviendas, entre otros que restaron resistencia a las estructuras.

De acuerdo con la Figura 4-14, la aceleración pico en dirección NS se produjo para estructuras de periodos cortos, características que poseen las viviendas bajas y de mampostería.

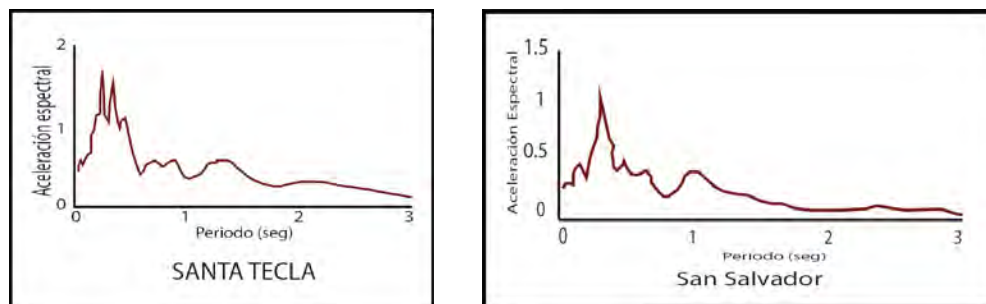


Figura 4-14 Registros de aceleración, velocidad y desplazamiento debido al sismo de 2001.

Se analizó los datos de viviendas donde se consideró el comportamiento histórico de los materiales predominante en los muros, en el que se tomó como menos vulnerable el sistema mixto o de concreto, por las condiciones de buen desempeño en los eventos sísmicos.

Con estos criterios, se tiene una evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica en la cual para representar el análisis se adoptó la escala mostrada en la Tabla 4-17. En donde el color rojo indica que existe más del 50% de viviendas con materiales de construcción no sismorresistentes, por ejemplo adobe, bahareque, etc. Por otro lado, el color cian representa que más del 90% de las viviendas están construidas con materiales de construcción de mayor resistencia, es decir, el sistema mixto o concreto. Además, el rango estudiado indica el número de viviendas en porcentaje.

Tabla 4-17 Escala de vulnerabilidad sísmica adoptada basada en los materiales de construcción.

Indicador	INTERVALO
	> 50% de población vulnerable
	40% < población vulnerable <= 50
	30% < población vulnerable <= 40%
	20% < población vulnerable <= 30%
	10% < población vulnerable <= 20%
	<= 10% población vulnerable

Como se estudió en la sección 4.2, los materiales de construcción predominantes mantienen la misma tendencia que a nivel nacional, siendo el de mayor utilización la mampostería.

El resultado del análisis de las tipologías estructurales adoptadas para la investigación se muestra en la Figura 4-15 donde se observa el grado de vulnerabilidad sísmica a nivel de zonas y de departamentos.

El mapa muestra una diferencia en la evolución de los materiales muy marcada entre la Zona Norte y el resto del país. Entre las razones por las cuales existe esta diferencia está el comportamiento socio-económico que arraigan a la población a continuar con los esquemas de vida tradicionales.

Otro factor influyente es la sismicidad de El Salvador, que como ya se expuso en el apartado 4.1, se divide en dos zonas de peligro sísmico, Figura 4-1. En el mapa de la Figura 4-15 se muestra que los departamentos ubicados en la zona Norte del país son los más vulnerables, pues el porcentaje de viviendas construidas con materiales no aptos para soportar un sismo de mediana o gran intensidad es elevado.

En la Tabla 4-18 se muestran los rangos de porcentajes de viviendas vulnerables en la Zona Central y Paracentral de El Salvador por departamento los cuales se aprecian los más vulnerables.

Tabla 4-18 Intervalo de porcentajes de viviendas vulnerables por departamento

Departamento	Intervalo de Vulnerabilidad sísmica
San Salvador	6.4 - 10.4
Chalatenango	46.7 - 54.6
La Libertad	17.9 - 23
Cuscatlán	34.1 - 38.3
La Paz	24.8 - 28.1
Cabañas	37.4 - 43.9
San Vicente	29.2 - 32.5

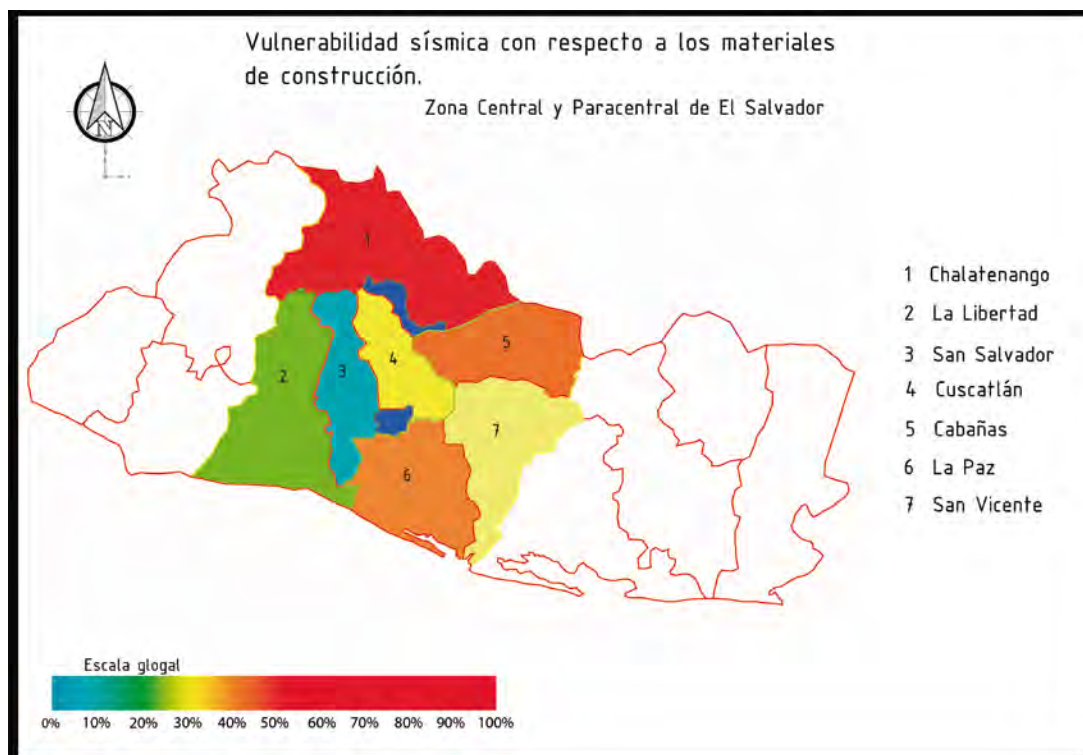


Figura 4-15 Vulnerabilidad sísmica con respecto a los materiales de construcción en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

El departamento de Chalatenango, por ejemplo es el más vulnerable de la Zona Central y Paracentral de El Salvador ya que sus estructuras susceptibles a los sismos representan más del 50% del total existente, Figura 4-16.

Chalatenango está ubicado geográficamente en la zona sísmica II, cuya característica es tener un peligro sísmico bajo. Históricamente, los sismos no afectan esta zona con intensidades importantes. Por lo que para la población chalateca no representa una necesidad que sus procesos constructivos cambien y los materiales de construcción pueden ser frágiles como el adobe, bahareque, etc.

En segundo lugar, el departamento de Cabañas con el 47% de viviendas vulnerables. El departamento está dividido entre la zona I y la zona II, por lo cual los materiales de construcción han cambiado; sin embargo, aún las intensidades sísmicas no son fuertes como en el resto del país.

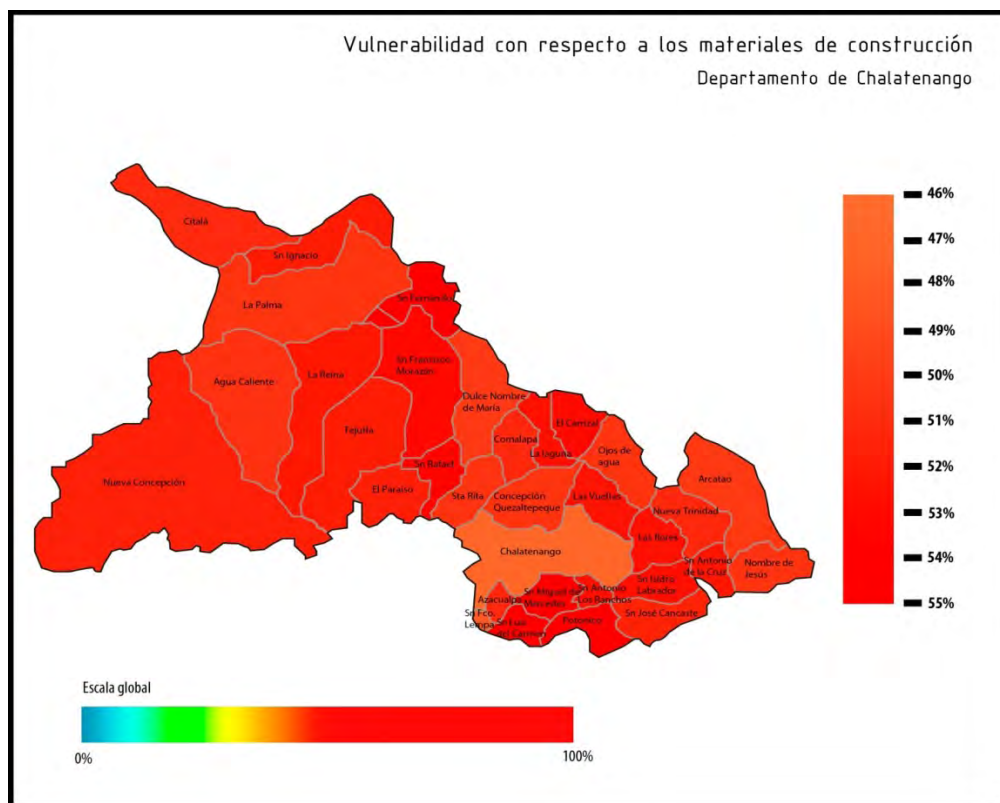


Figura 4-16 Departamento de Chalatenango

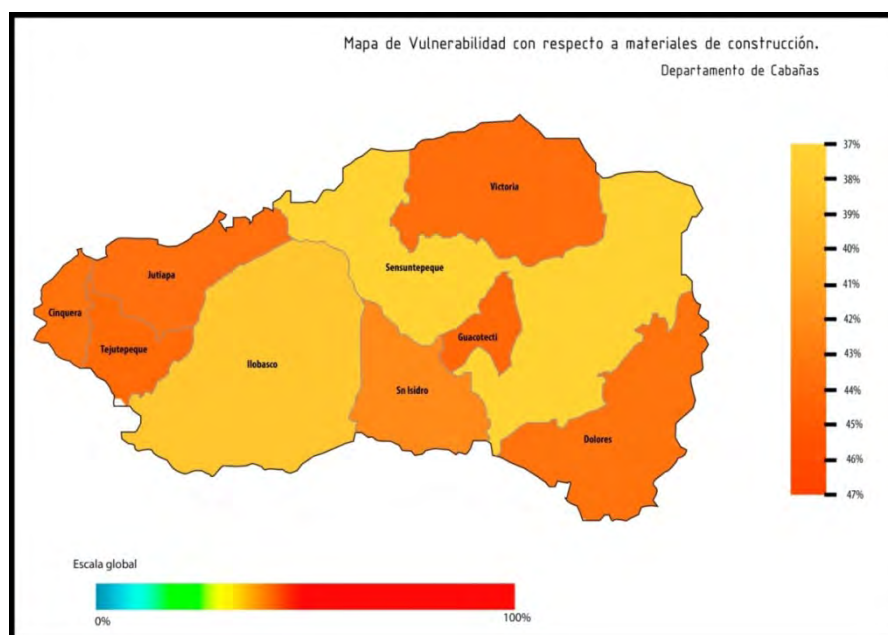


Figura 4-17 Departamento de Cabañas.

En caso contrario, está el departamento de San Salvador con menos del 10% de viviendas vulnerables, esto se puede explicar por muchas influencias, por ejemplo el desarrollo propio de una ciudad capital de país que representa fuente de desarrollo urbano con evolución en las construcciones. Además la ciudad ha sido devastada en varias ocasiones por fuertes sismos por lo cual las reconstrucciones se deben realizar con métodos y técnicas resistentes a los eventos.

El resultado de los cálculos basados en los materiales de construcción se muestran en mapas desde la Figura 4-16 hasta la Figura 4-21 donde se especifica por municipios de cada departamento.

Luego del departamento de San Salvador, se encuentra La Libertad, fenómeno que es de esperarse pues junto con la capital, muchos de sus municipios forma parte del desarrollo de la urbe capitalina, Figura 4-19.

La Paz es un departamento que alberga en su territorio varios epicentros de sismos devastadores en los cuales muchos de sus municipios quedan en ruinas, sin embargo un factor como una economía deprimida influye grandemente en el sector construcción, Figura 4-20.

San Vicente, al igual que La Paz, es una región que ha albergado muchos de los epicentros de algunos de los sismos más importantes en El Salvador, por lo que se observa que la cantidad de viviendas con sistemas no sismorresistentes es menor, sin embargo su desarrollo económico no es tan grande como para sustituir sistemas constructivos.

El departamento de Cuscatlán está ubicado en la Zona sísmica I, colindando con San Salvador, por lo cual es un territorio propenso a muchos sismos de importante intensidad, por lo que responde con un porcentaje importante de existencia de mampostería reforzada, con un promedio del 64%, Figura 4-22.

Mapa de vulnerabilidad con respecto a los materiales de construcción.

Departamento de San Salvador

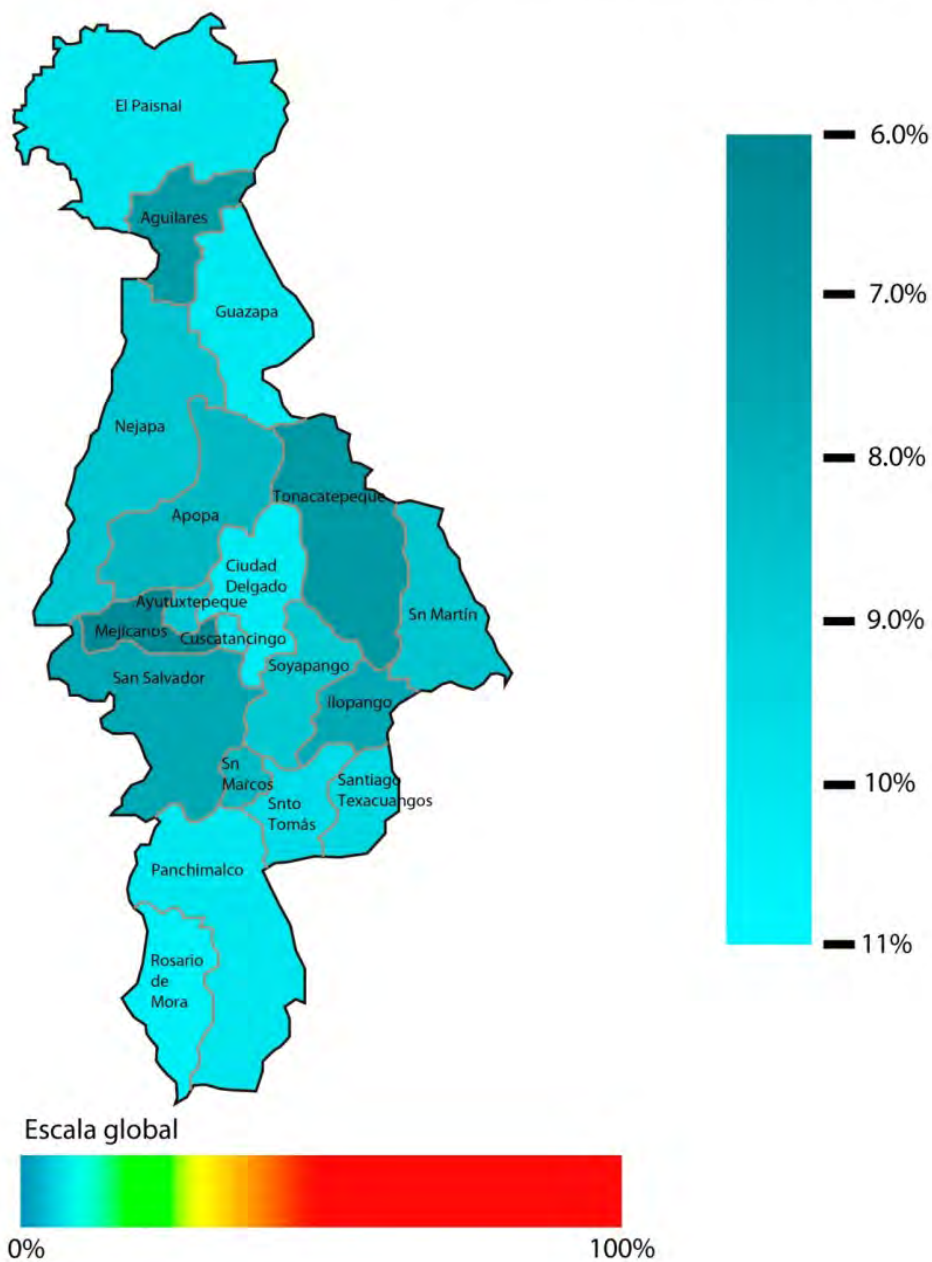
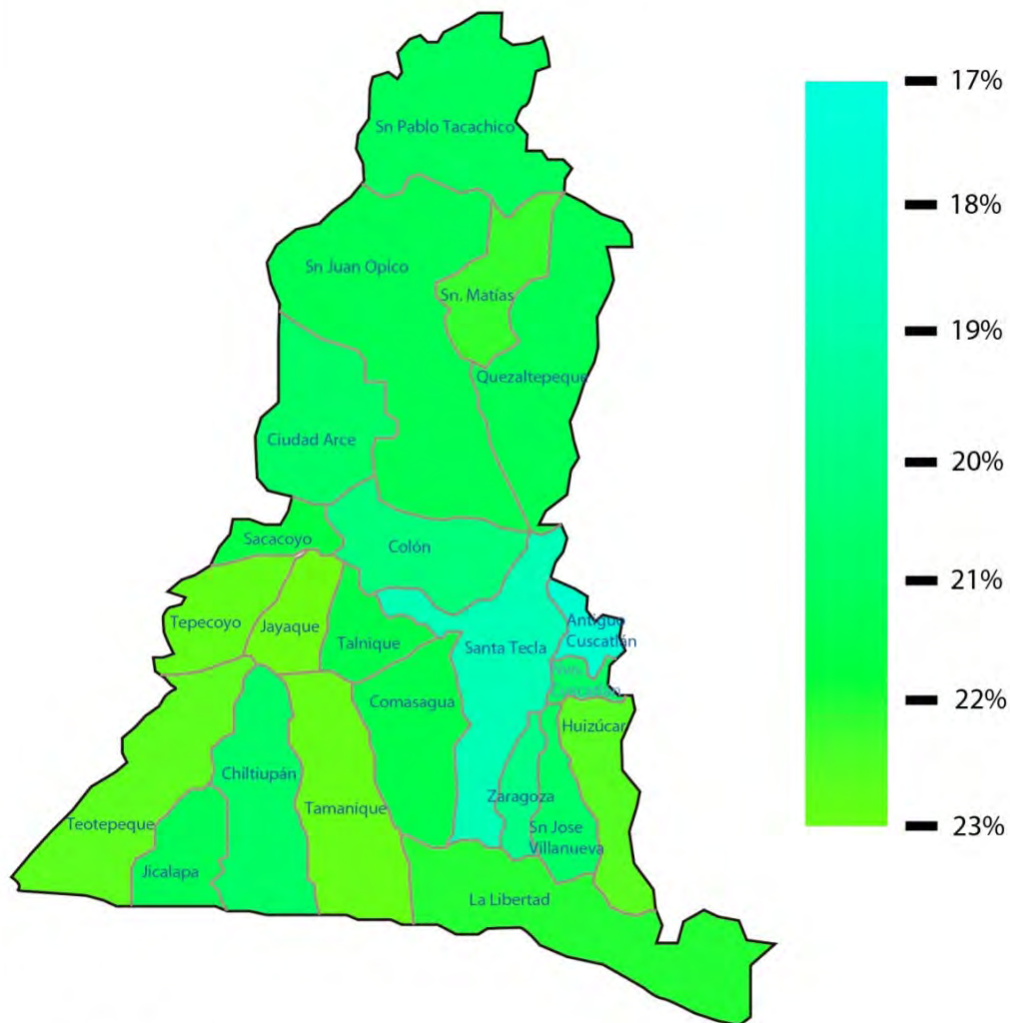


Figura 4-18 Departamento de San Salvador

Mapa de Vulnerabilidad con respecto a los materiales de construccion.

Departamento de La Libertad



Escala global



Figura 4-19 Departamento de La Libertad

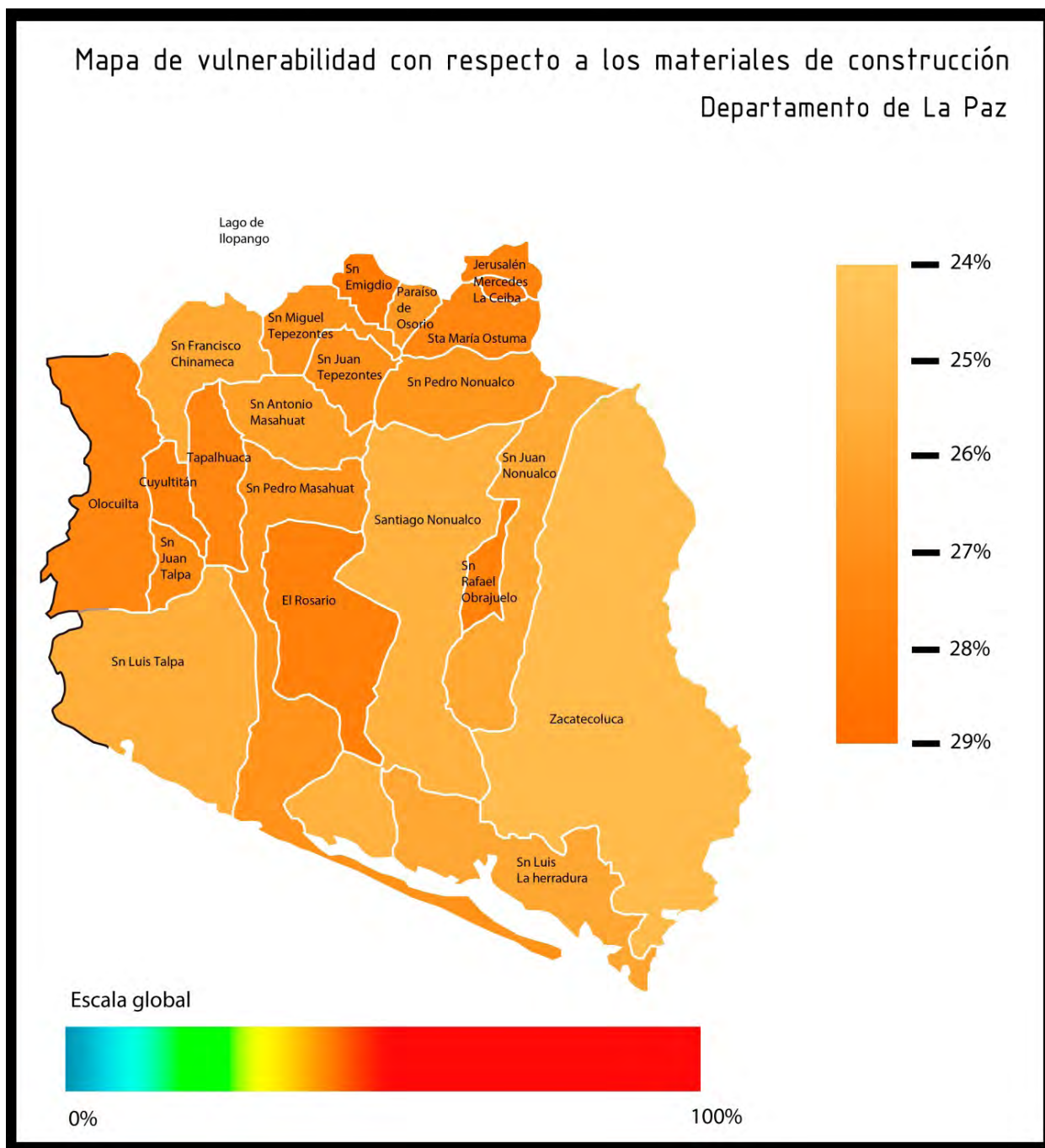


Figura 4-20 Departamento de La Paz

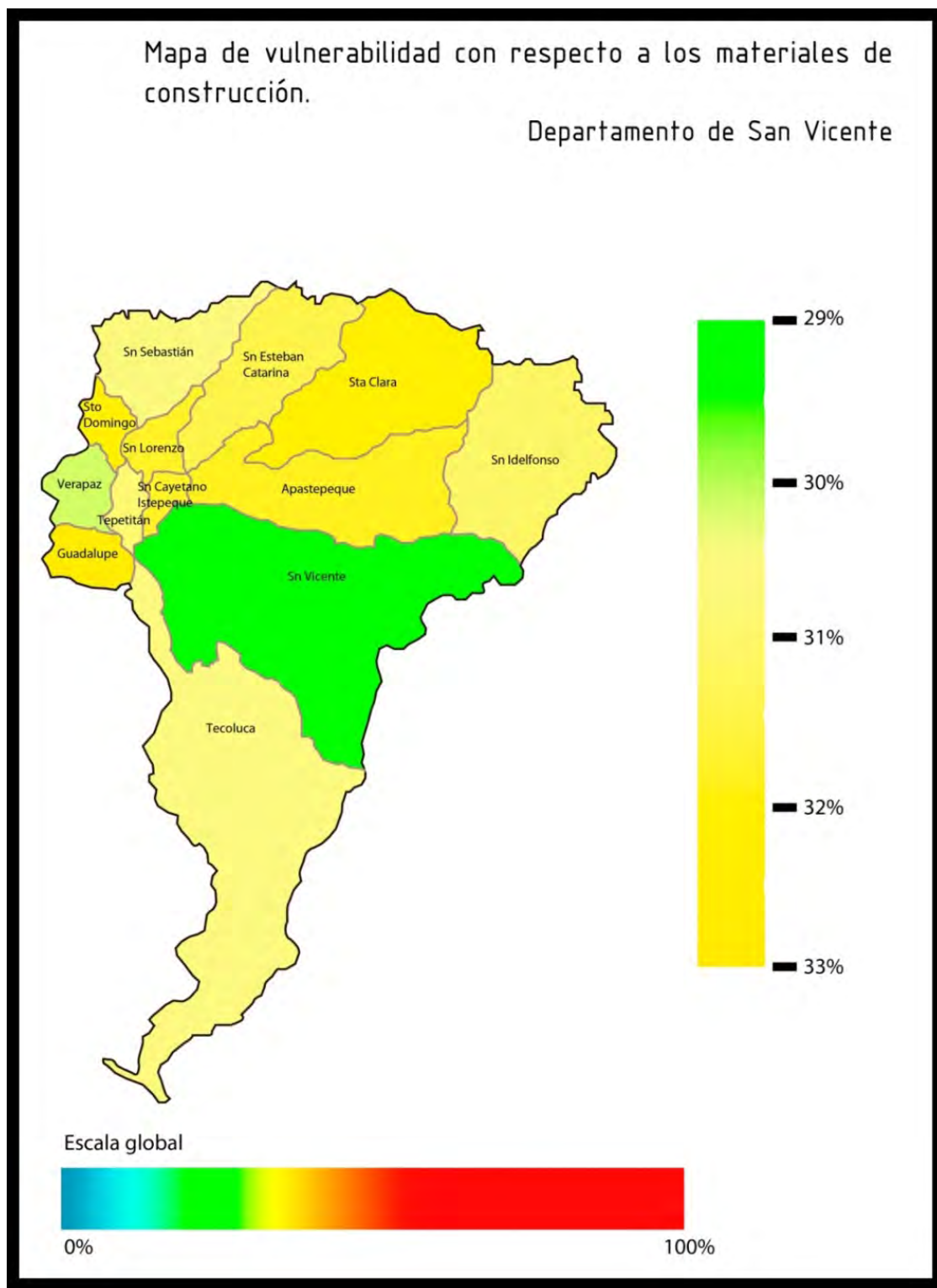
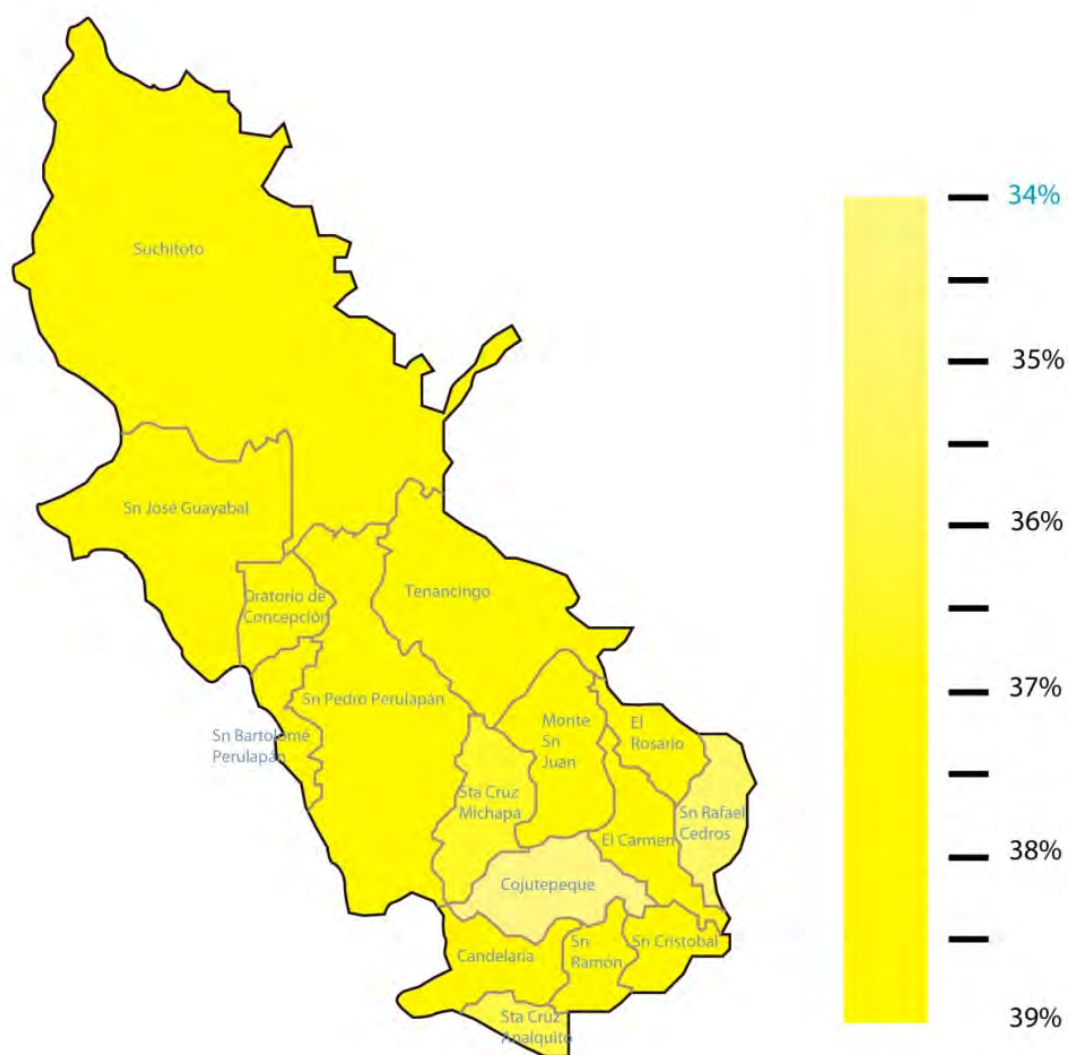


Figura 4-21 Departamento de San Vicente

Mapa de Vulnerabilidad con respecto a materiales de construcción Departamento de Cuscatlán



Escala global



0%

100%

Figura 4-22 Departamento de Cuscatlán

4.4.1. Vulnerabilidad alta, media y baja en los municipios de la Zona Central y Paracentral de El Salvador.

El **municipio más vulnerable** de la zona es San Luis del Carmen, departamento de Chalatenango, el cual tiene el 51% de viviendas de adobe, seguido del 45% de mampostería, el 1.25% de bahareque y el 2.75% distribuido en los demás materiales de construcción, Figura 4-23.

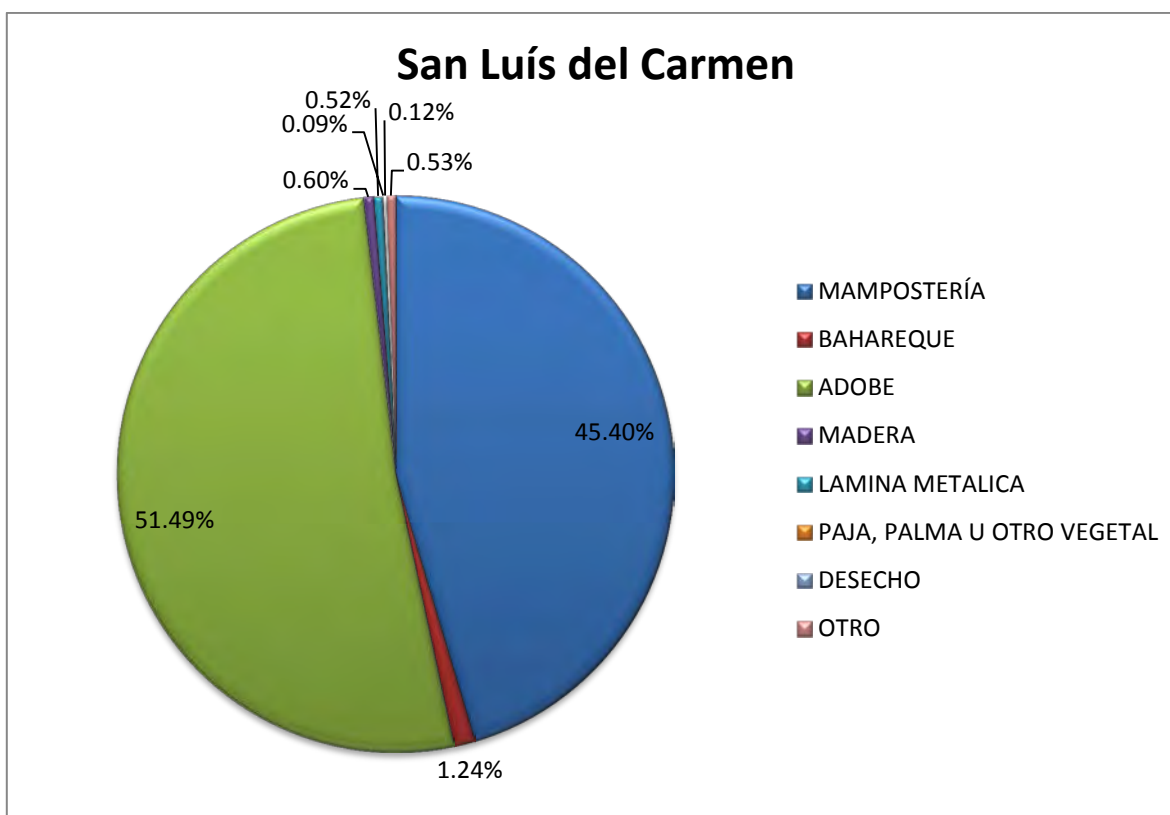


Figura 4-23 Materiales de construcción en el municipio San Luis del Carmen, Chalatenango

El municipio menos vulnerable con es Mejicanos, departamento de San Salvador, en el cual únicamente el 6% de las viviendas están construidas con materiales no sismorresistentes, sin embargo para poder tener una verdadera noción de esto se debe analizar de igual forma el entorno del municipio.

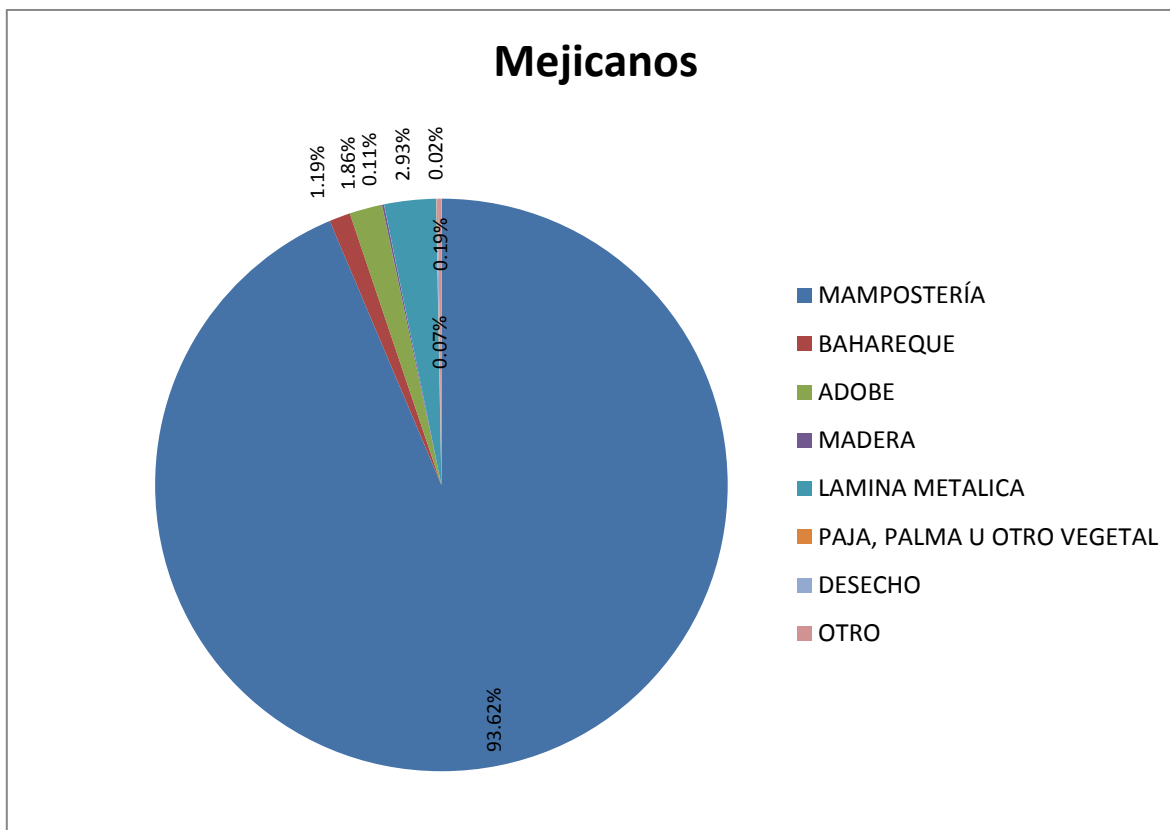


Figura 4-24 Materiales de construcción en el municipio de Mejicanos

Para ejemplificar un municipio promedio alto de la zona, se presenta al municipio de Antiguo Cuscatlán el cual no tiene zona rural y todo se desarrolla en el ámbito urbano. El porcentaje de vivienda no apta para resistir sismos es del 18% una cantidad alta sin embargo razonable.

En este trabajo se considera al adobe como material no sismorresistente y altamente vulnerable ya que a pesar de todos los estudios realizados tanto en América Latina como en El Salvador donde se justifica el uso adecuado del adobe estabilizado para zonas sísmicas, aún no se logra que estos proyectos se expandan y tengan la aceptación total de la población ni gubernamental. Por ejemplo el proyecto Taishin en el cual se presentan métodos para estabilizar el adobe, resultando una vivienda de bajo costo y con elementos sismorresistentes (Peña, López, & Guevara Morales, 2008).

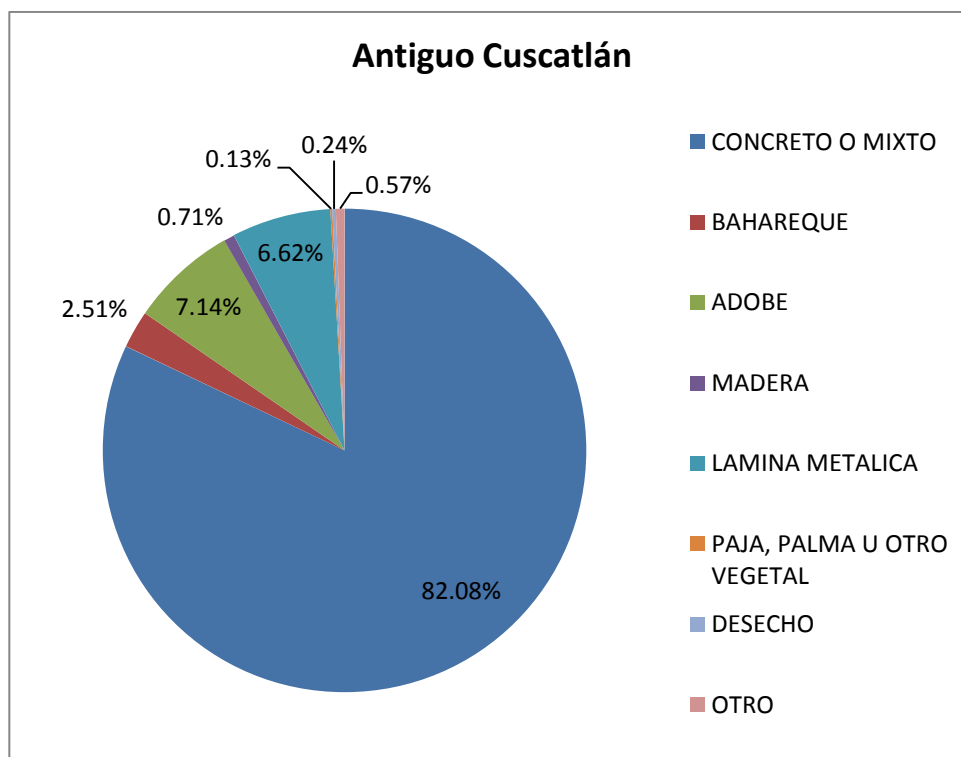


Figura 4-25 Materiales de construcción en el municipio promedio

4.5. Matrices de Probabilidad de Daño para la Zona Central y Paracentral de El Salvador

De acuerdo con la investigación que se realizó del Estado del Arte de la Vulnerabilidad Sísmica en El Salvador, no existen curvas de fragilidad para un conglomerado de viviendas aplicada a las condiciones del país.

El Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en coordinación con la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” presentó un informe en 2012 en el cual se estudia la amenaza sísmica de El Salvador y presenta modelos de atenuación, estudios geológicos, geotécnicos y generación de curvas de vulnerabilidad sísmica para el AMSS específicamente para instalaciones de las carteras de educación, salud y gobierno. Otros estudios realizados en El Salvador, ver la Sección 3.5, se dedicaron a estudiar métodos del índice de vulnerabilidad aplicados a los sectores educativo, salud, entre otros.

Sin embargo para el sector vivienda, que representa parte importante para el desarrollo normal de una economía y la gran mayoría de las edificaciones de El Salvador, no hay estudios de vulnerabilidad sísmica; por lo cual en este trabajo se proponen curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño para vivienda de la Zona Central y Paracentral de El Salvador.

4.5.1. Mampostería

Las viviendas de mampostería constituidas por el tabique rojo o bloque de concreto, representa la forma típica de construcción en El Salvador y en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, ver Sección 4.2.

La tipología de estas estructuras, Sección 4.2, es una planta rectangular la cual dependiendo del tipo de vivienda, interés social, vivienda de clase media o alta, varía la dimensión y la regularidad de la misma. No obstante, a pesar de las diversidades de formas de construcción, se propone una planta general que representa la vivienda media de El Salvador, Figura 4-26.

Según la normativa, si es bloque de concreto, las paredes deben reforzarse a no más de 80 cm de distancia por cada bastón, Figura 4-28 y Figura 4-30, sin embargo, existen construcciones en las cuales este espaciamiento es mucho mayor o en ocasiones la colocación del refuerzo es inexistente, práctica que se da en ambos sectores, formal e informal, de la construcción.

Para la estructura de techos, cuya disposición es a dos aguas, Figura 4-29, se colocan perfiles CF colocados en un rango entre 0.90 m hasta 1.20 m entre eje y eje, para colocar una cubierta de lámina o de fibro cemento, Figura 4-31 . La altura del techo de las viviendas que son de un nivel no sobrepasa los 3.5 m de altura para viviendas tal como se indica en las normas.

Al analizar algunos aspectos relevantes en el comportamiento sísmico de las viviendas se tiene la simetría en planta de la estructura, la cual se cumple, de acuerdo a la propuesta para este trabajo, Figura 4-26.

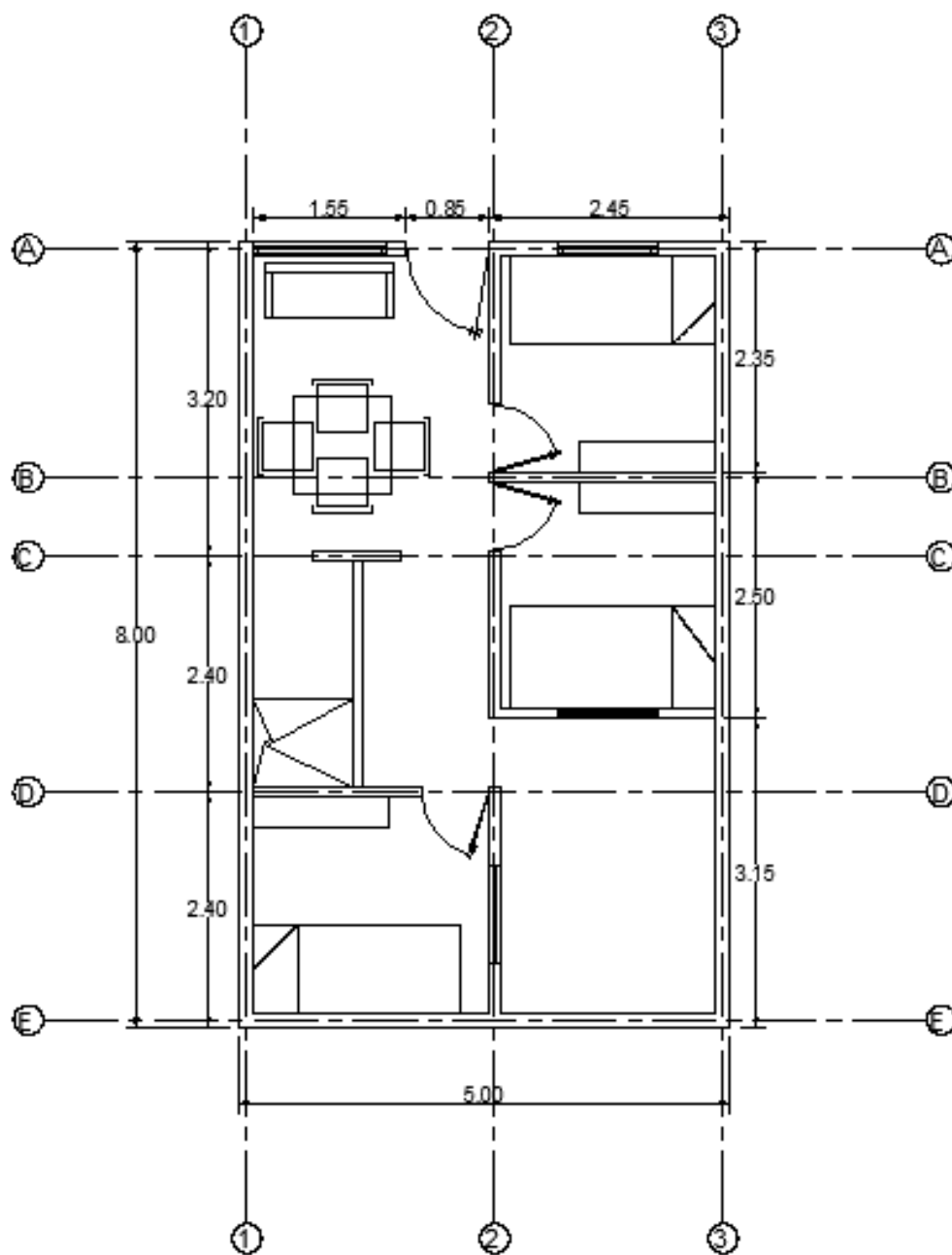


Figura 4-26 Planta general de vivienda de mampostería El Salvador

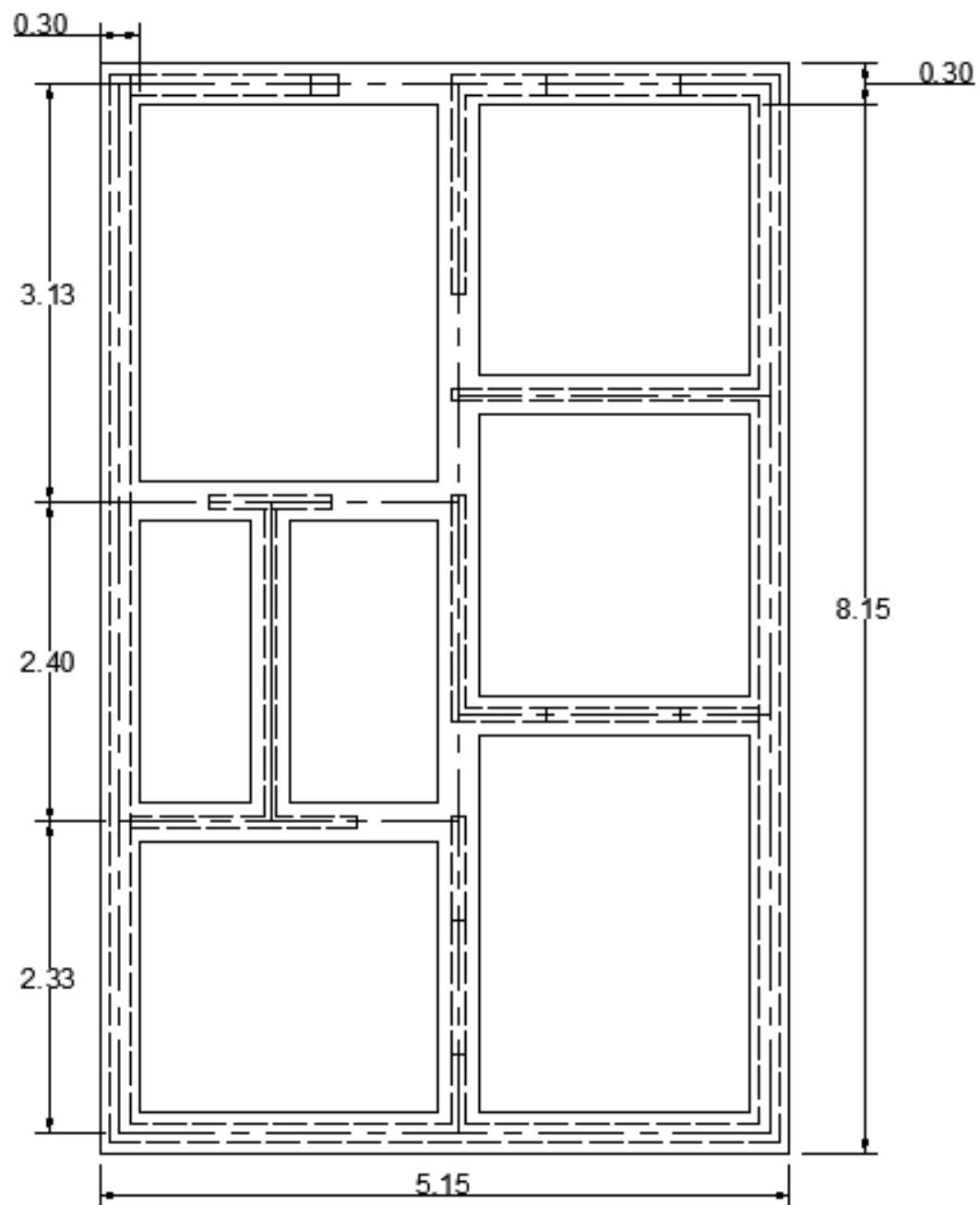


Figura 4-27 Cimentaciones mínimas de acuerdo a la Norma Especial para diseño y construcción de viviendas

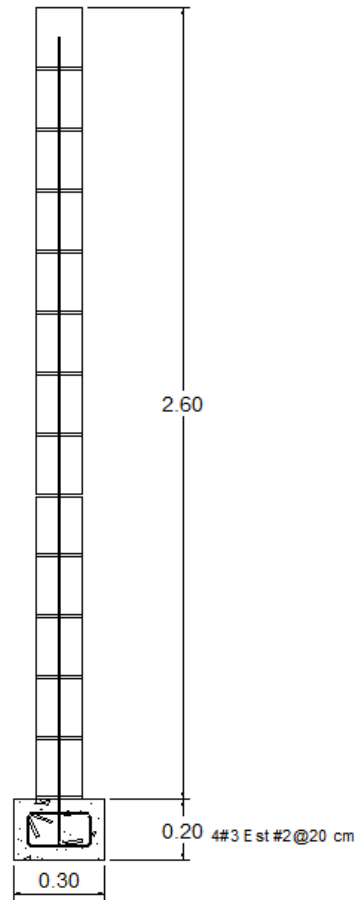


Figura 4-28 Sección transversal de muro de mampostería reforzada

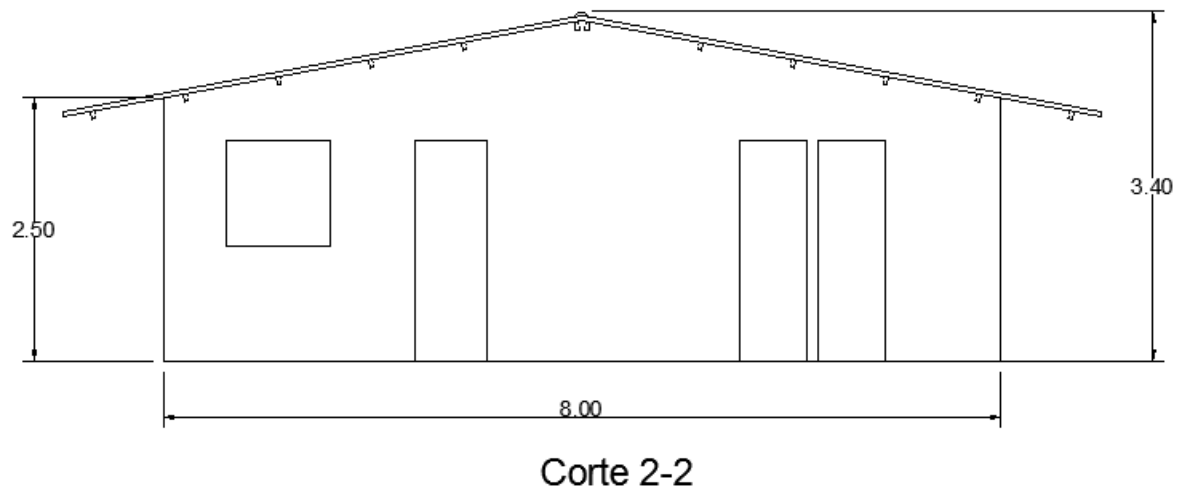


Figura 4-29 Corte en eje 2-2 de vivienda típica

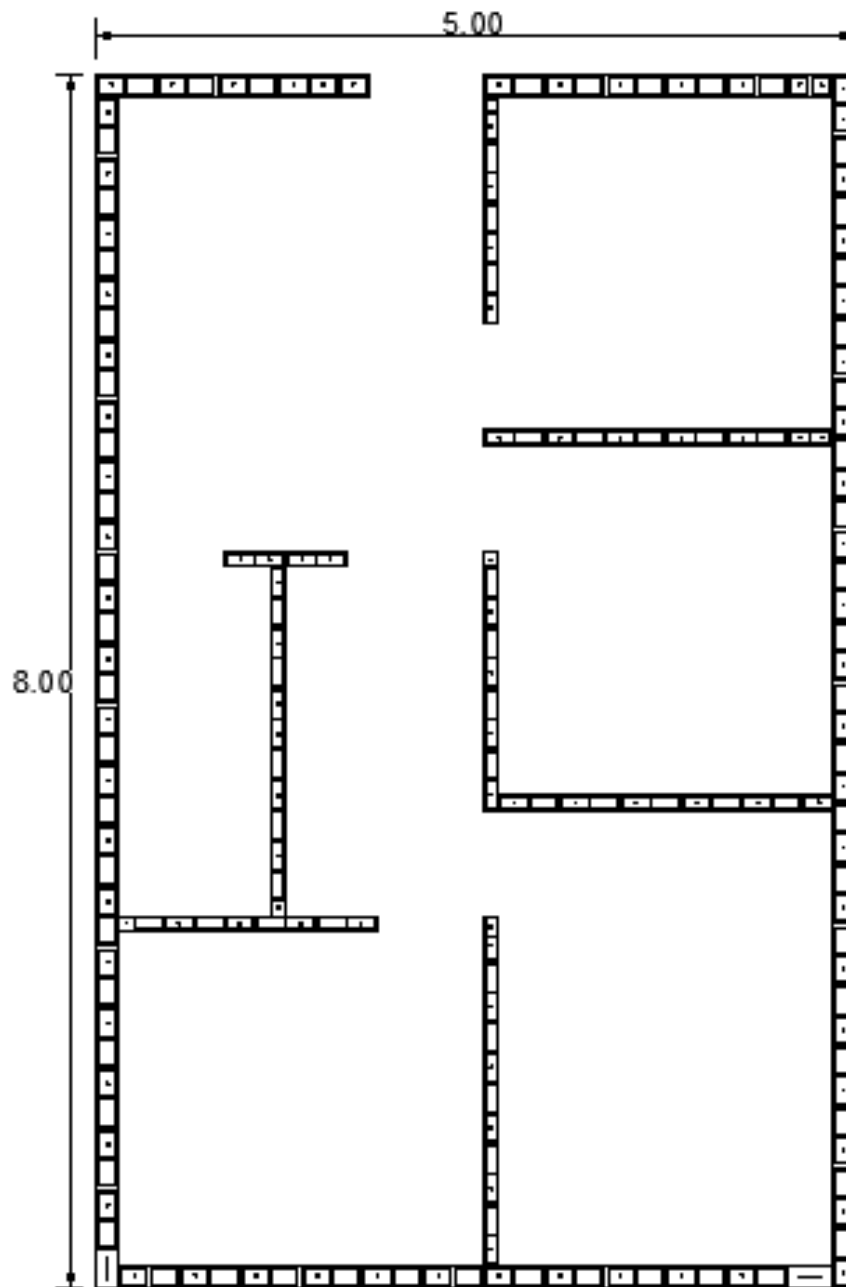


Figura 4-30 Planta de refuerzo de paredes de acuerdo a la Norma Especial para diseño y construcción de viviendas

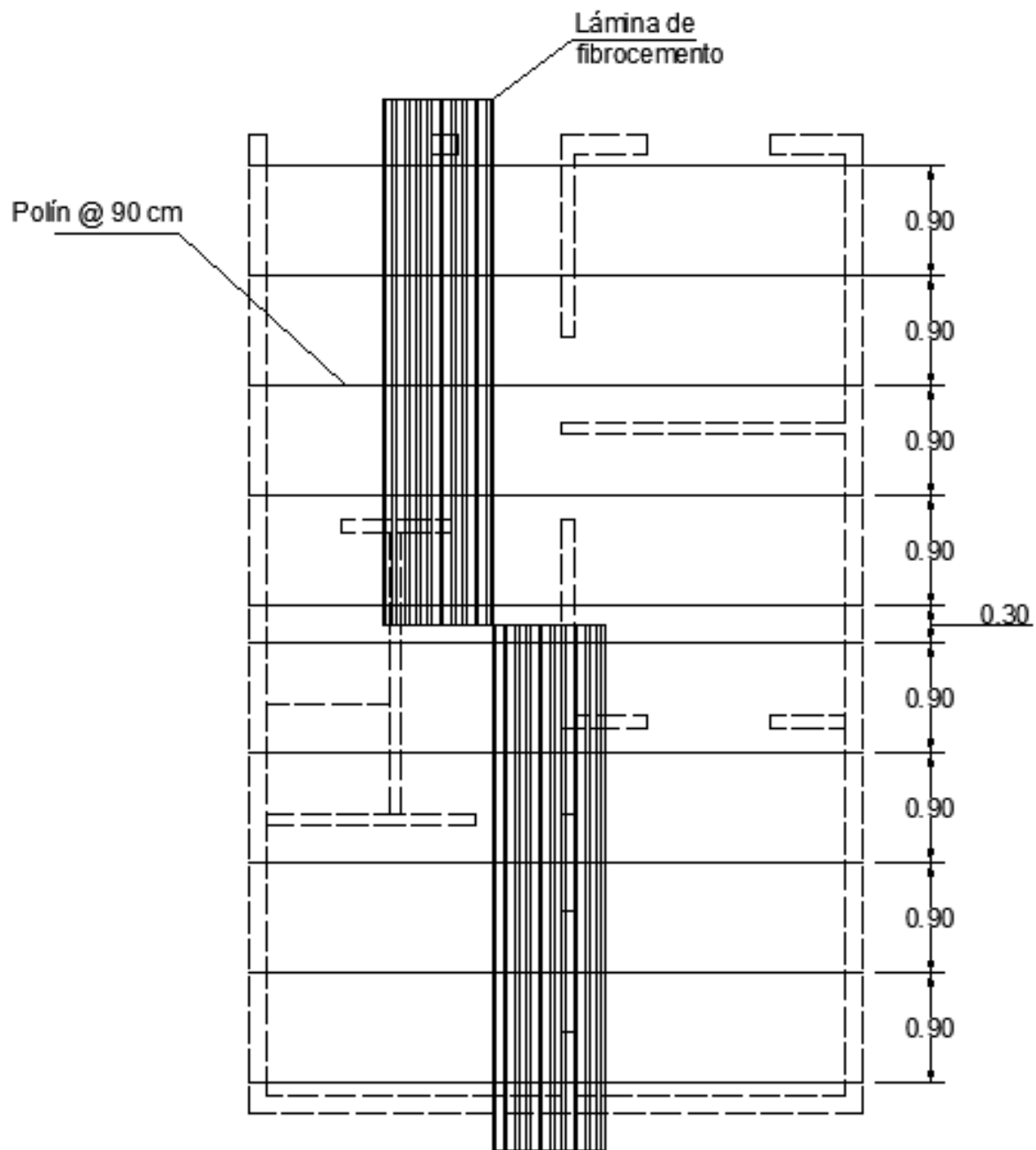


Figura 4-31 Planta de techos de vivienda típica

La simetría de una estructura evita que ante cargas dinámicas, se generen fuerzas de torsión que provocan esfuerzos adicionales en los elementos estructurales. De acuerdo a esto, se comprueba que las plantas de las viviendas cumplen con los requisitos de la Ecuación 4-1, en donde la relación de sus lados no excede de 3, Tabla 4-19.

$$\frac{L}{B} \leq 3$$

Tabla 4-19 Comprobación de criterio de plantas alargadas en las viviendas

Tipo de vivienda	L	B	Relación
Mínima	6	4.5	1.33
Media	8	5	1.60
Alta	20	10	2.00

Los criterios de estructuración de una vivienda de mampostería indican que es indispensable que las mismas tengan confinamiento y refuerzo adecuado tanto en las esquinas como en los huecos de puertas y ventanas, así mismo a una distancia no mayor de 4 m.

La inexistencia o inadecuado refuerzo y confinamiento, induce en que las fuerzas cortantes se propaguen y sometan a la mampostería a esfuerzos que no es capaz de resistir, además que la calidad del mortero con el cual se ha unido las piezas en la mayoría de los casos se trata de un mortero pobre, provocando falla en la diagonal.

Con el análisis de los datos generales de la mampostería en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, se toma de referencias Matrices de Probabilidad de Daños de otros países en los cuales se tienen estudios exhaustivos y muy desarrollados en el tema.

Entre ellas, la MPD desarrollada por el ATC-13 en los Estados Unidos, Tabla 4-20, en la cual se tiene un 3.7% de probabilidad que una edificación de mampostería de baja altura en el estado de California, Estados Unidos no tenga daño ante un sismo de intensidad VI en escala de MMI; el 65.8% de alcanzar un daño mínimo y el 27.8% de tener un daño ligero.

Tabla 4-20 Matriz de Probabilidad de Daños para mampostería de baja altura, ATC-13

CALIFORNIA									
RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	3.7						
0-1	Muy leve	0.005	68.5	26.8	1.6				
1-10	Leve	0.05	27.8	73.2	94.9	62.4	11.5	1.8	
10-30	Moderado	0.2			3.5	37.6	76	75.1	24.8
30-60	Alto	0.45					12.5	23.1	73.5
60-100	Severo	0.8							1.7
100	Colapso	1							
FDM			1.7325	3.794	5.453	10.64	21.4	25.505	39.395

Además, se toma de referencia la investigación “Estimación de pérdidas por sismo en edificios peruanos mediante curvas de fragilidad analíticas” (Velásquez Vargas, 2006), de donde se toma la MPD propuesta para estructuras de mampostería reforzada, Tabla 4-21.

Tabla 4-21 Matriz de probabilidad de daño para mampostería reforzada de baja altura, Perú

PERU									
RANGO FACTOR DE DAÑO (%)	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	1.5						
0-1	Muy leve	0.005	48.6	2.8	0.2				
1-10	Leve	0.05	49.9	89.8	37.6	5.9	0.7		
10-30	Moderado	0.2		7.4	59.6	74.7	31.6	5.9	1.9
30-60	Alto	0.45			2.6	19.4	63.3	54.9	24.3
60-100	Severo	0.8					4.4	39.2	69.6
100	Colapso	1							4.2
FDM			2.738	5.984	14.971	23.965	38.36	57.245	71.195

Las matrices presentadas anteriormente, son ejemplos de investigaciones exhaustivas en las cuales se ha seguido el procedimiento teórico como el presentado en la sección 3.4 de esta tesis, donde se recabó la información y se utilizó métodos históricos con levantamientos de daños, análisis de elementos finitos, entre otros.

Sin embargo, para casos en los cuales no se tiene información completa o los datos no son certeros, se establecen hipótesis y suposiciones con las cuales se llega al planteamiento de una MPD.

Gómez Bernal y otros, en su artículo “Riesgo Sísmico y Escenarios de Daño en la Colonia Roma” realizaron una investigación sobre la estimación de daños en un sector de la colonia Roma, Distrito Federal. En ésta, se tomó de referencia las funciones de vulnerabilidad según la EMS98 (Escala Macrosísmica Europea) para la mampostería; sin embargo para las estructuras de concreto, éstas no son aplicables pues los daños ocurridos no siguen la tendencia de la curva.

Debido a la carencia de datos certeros, Gómez Bernal y otros, plantean sus hipótesis y suposiciones en las que hacen inferencias para proponen una MPD que representa mejor el comportamiento de estructuras de concreto en la Colonia Roma (Gómez Bernal, y otros, 2005)

Con las referencias consultadas, se tomaron criterios para proponer las matrices de probabilidad de daños para la mampostería en El Salvador, las cuales se basan en el comportamiento de estructuras similares en los países de referencia, además se incluye el factor de daños históricos que se tienen del país a partir de informes publicados por el Gobierno de El Salvador, por instituciones internacionales, etc.

En apartados anteriores, se planteó que las viviendas de mampostería son construidas por el sector informal, que puede ser por ejemplo la autoconstrucción; o bien por el sector formal, profesionistas que diseñan y ejecutan con criterio una obra donde se obedece las normas y reglamentos; en concordancia con este punto de vista, la construcción de mampostería se puede dividir en ramas como se muestra en la Figura

4-32. Con estas clasificaciones, se plantean 5 matrices de probabilidad de daños para la vivienda de mampostería.

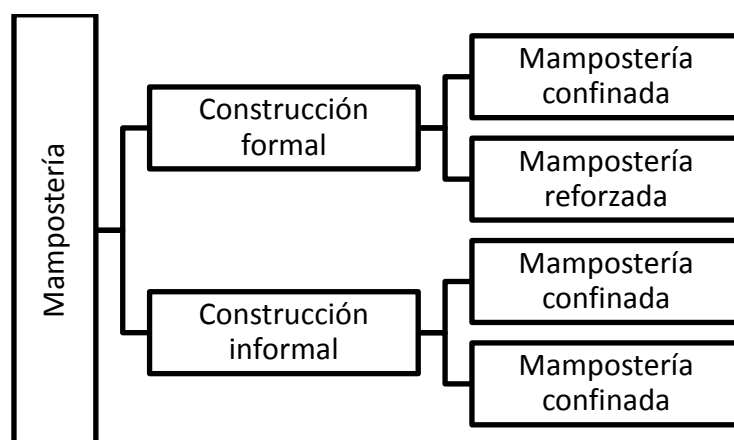


Figura 4-32 Subdivisión de la mampostería en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

En la Tabla 4-22, se presenta la Matriz de Probabilidad de Daños para viviendas de baja altura de mampostería, el parámetro que define el movimiento del terreno está en escala de intensidad Mercalli Modificada que inicia en la intensidad VI, debido a que es el punto donde la escala comienza a medir los daños a las estructuras hasta el XII donde se representa un evento de gigantescas dimensiones.

Tabla 4-22 Matrices de probabilidad propuesta para El Salvador para mampostería reforzada de baja altura

EL SALVADOR (PROPUESTA)									
RANGO FACTOR DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	2.5						
0-1	Muy leve	0.005	49.7	6.7					
1-10	Leve	0.05	47.8	75.1	25.4	6.4			
10-30	Moderado	0.2		18.2	59.6	65.3	24.3	2.1	
30-60	Alto	0.45			15	21.3	65.1	43.8	15.9
60-100	Severo	0.8				7	10.6	35.9	58.7
100	Colapso	1						18.2	25.4
FDM			2.6385	7.4285	19.94	28.565	42.635	67.05	79.515

Se puede interpretar como: para un sismo de intensidad VI, la probabilidad que la vivienda de mampostería sufra daño leve es de 48% aproximadamente. Y para un sismo de intensidad IX tengan un estado de daño moderado, es del 65%.

La MPD para la mampostería se propone a partir de las cifras reportadas de daños en sismos pasados, por ejemplo los sismos de 2001, enero y febrero. En donde, a partir de las isosistas presentadas por el MARN se determina la intensidad en cada departamento y el número de viviendas dañadas, afectadas o destruidas.

Por ejemplo, al calcular de manera sencilla la probabilidad que para un sismo con intensidad VII en escala MMI las viviendas presenten daños moderados en el departamento de La Paz, se realizó el siguiente procedimiento:

En el informe de la CEPAL para el sismo de 2001 presentó que para el departamento de La Paz, se tuvo 38,490 viviendas dañadas con algún tipo de daño cuyo material de construcción es la mampostería, de las cuales 17,117 con viviendas con daños considerables.

El censo de la DIGESTyC muestra que existe un total de 91,622 viviendas en dicho departamento. Por lo tanto, la probabilidad que las viviendas tenga daños moderados es del 18%, valor indicado en la MDP propuesta para la mampostería de El Salvador.

De esta manera sencilla y somera, se construyó la MPD para la mampostería de El Salvador, sin embargo es importante acentuar que se propuso bajo el método de la opinión de expertos; es recomendable en estudios posteriores que ésta se calibre afinando los métodos probabilísticos, los levantamientos de los daños en eventos futuros e incluir un análisis más refinado y detallado en cuanto a la estructuración de las viviendas.

La MPD para vivienda de mampostería reforzada construida bajo las directrices de la normativa de El Salvador, es decir bajo la clasificación de Construcción formal, se presenta en la Tabla 4-24. Esta matriz se interpreta como: la probabilidad que la vivienda

bajo estas condiciones tenga un daño moderado es del 20% durante un sismo de intensidad VII en escala MMI, y en un sismo de intensidad X será del 27%.

Tabla 4-23 MPD propuesta para viviendas de mampostería reforzada, Construcción formal

EL SALVADOR MAMPOSTERÍA CONSTRUCCIÓN FORMAL REFORZADA (PROPUESTA)									
RANGO FACTOR DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	2.75						
0-1	Muy leve	0.005	54.67	7.37					
1-10	Leve	0.05	52.58	82.61	27.94	7.04			
10-30	Moderado	0.2		20.02	65.56	71.83	26.73	2.31	
30-60	Alto	0.45			16.5	23.43	71.61	48.18	17.49
60-100	Severo	0.8				7.7	11.66	39.49	64.57
100	Colapso	1						20.02	27.94
FDM			2.90	8.17	21.93	31.42	46.90	73.76	87.47

Para la mampostería confinada clasificada como construcción formal, se presenta la MPD en la Tabla 4-24. Si se plantean los dos escenarios anteriores, en el primero se presenta una intensidad de VII la probabilidad para esta clasificación es del 22% y con una intensidad de X, el 29%.

Tabla 4-24 MPD propuesta para viviendas de mampostería confinada, Construcción formal

EL SALVADOR MAMPOSTERÍA CONSTRUCCIÓN FORMAL CONFINADA (PROPUESTA)									
RANGO FACTOR DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	3						
0-1	Muy leve	0.005	59.64	8.04					
1-10	Leve	0.05	57.36	90.12	30.48	7.68			
10-30	Moderado	0.2		21.84	71.52	78.36	29.16	2.52	
30-60	Alto	0.45			18	25.56	78.12	52.56	19.08
60-100	Severo	0.8				8.4	12.72	43.08	70.44
100	Colapso	1						21.84	30.48
FDM			3.17	8.91	23.93	34.28	51.16	80.46	95.42

Similar análisis se realiza para la MPD en el sector informal, tanto para mampostería reforzada Tabla 4-25, como para la mampostería confinada, Tabla 4-26.

Tabla 4-25 MPD propuesta para viviendas de mampostería reforzada, Construcción informal

EL SALVADOR MAMPOSTERÍA SECTOR INFORMAL REFORZADA (PROPUESTA)									
RANGO FACTOR DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	3.25						
0-1	Muy leve	0.005	64.61	8.71					
1-10	Leve	0.05	62.14	97.63	33.02	8.32			
10-30	Moderado	0.2		23.66	77.48	84.89	31.59	2.73	
30-60	Alto	0.45			19.5	27.69	84.63	56.94	20.67
60-100	Severo	0.8				9.1	13.78	46.67	76.31
100	Colapso	1						23.66	33.02
FDM			3.43	9.66	25.92	37.13	55.43	87.17	100.00

De todas las matrices presentadas, la que presenta mayor vulnerabilidad es la construcción de vivienda de mampostería confinada en el sector informal, pues varios factores se conjuntan para incrementar la vulnerabilidad sísmica; por ejemplo, no hay control de la calidad del material que se está utilizando, ya sea este tabique, cemento, arena o aún el agua. Además, el criterio del espaciamiento del confinamiento es dejado al criterio del dueño de la vivienda los cuales, generalmente los colocan a separaciones mayores a las reglamentarias.

En la Figura 4-33 se muestra la gráfica de los Factores de Daño Medio para todas las MPD expuestas de Estados Unidos, Perú y El Salvador. De la gráfica se observa que El Salvador es el segundo país con alto porcentaje de vulnerabilidad de los tres propuestos.

Tabla 4-26 MPD propuesta para viviendas de mampostería confinada, Construcción Informal

EL SALVADOR MAMPOSTERÍA SECTOR INFORMAL CONFINADA (PROPUESTA)

RANGO FACTOR DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	FDC	PROBABILIDAD DE DAÑO EN PORCENTAJE						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	Ninguno	0	3.5						
0-1	Muy leve	0.005	69.58	9.38					
1-10	Leve	0.05	66.92	105.14	35.56	8.96			
10-30	Moderado	0.2		25.48	83.44	91.42	34.02	2.94	
30-60	Alto	0.45			21	29.82	91.14	61.32	22.26
60-100	Severo	0.8				9.8	14.84	50.26	82.18
100	Colapso	1						25.48	35.56
FDM			3.69	10.40	27.92	39.99	59.69	93.87	100.00

California, Estados Unidos tiene la curva con mayor pendiente, que significa que las estructuras tienen baja probabilidad de tener algún tipo de daño ante sismos aún de intensidades altas como es de IX en adelante.

A diferencia de El Salvador, que es un país muy vulnerable ubicado en una zona altamente sísmica donde las intensidades son altas, la aceleración pico del suelo ronda un valor de 0.4g, entre otros factores.

El comportamiento de las curvas están regidas en gran medida por el peligro sísmico en el cual se encuentre la región debido a que la historia hace que los materiales, técnicas constructivas y configuraciones estructurales se mejoren para hacer efectiva las lecciones aprendidas.

Sin embargo, también es influenciada por la economía de la región ya que a pesar que se puedan sustituir sistemas constructivos y técnicas, si la población no es capaz de pagar estas mejoras, volverá al sistema tradicional.

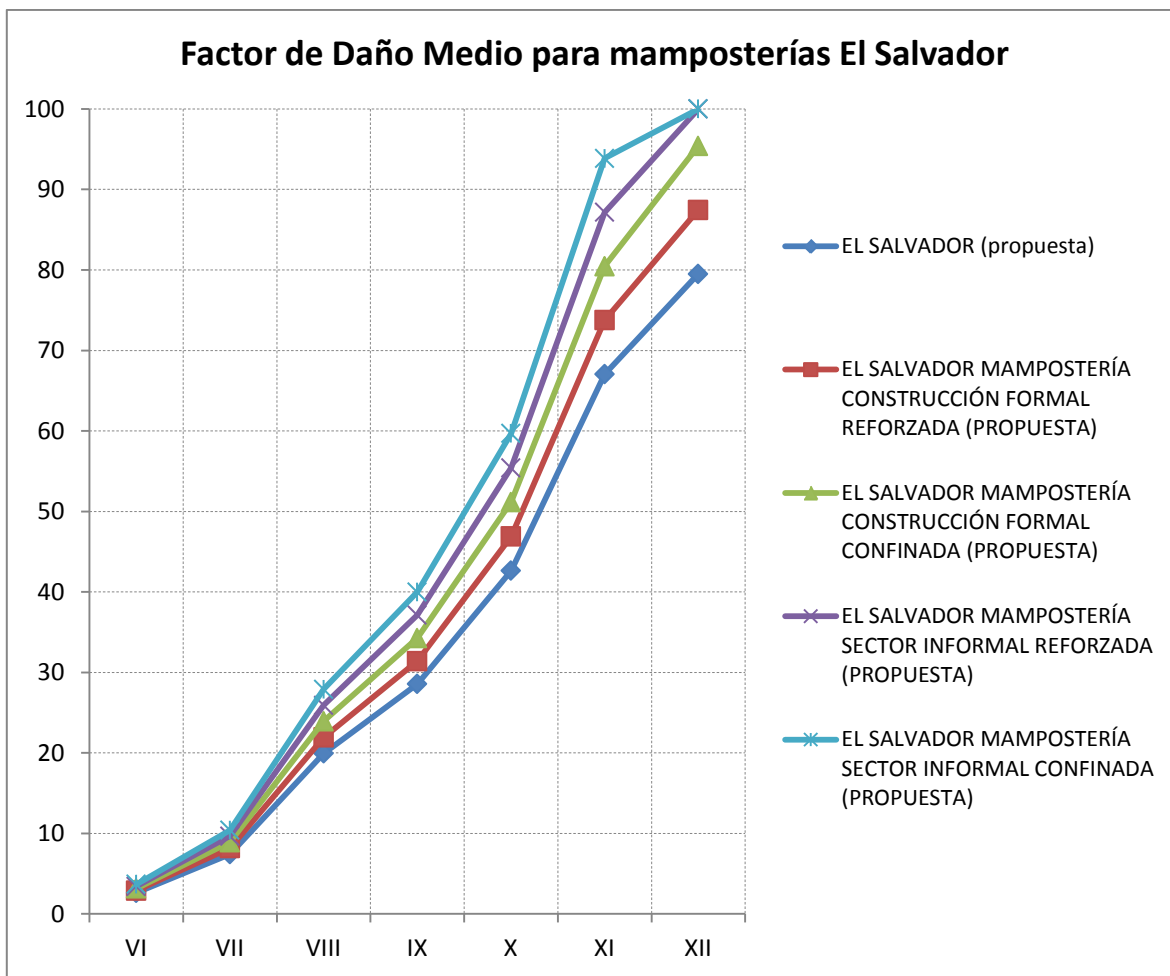


Figura 4-33 Curvas de FDM para mampostería de baja altura

4.5.2. Adobe

El adobe es un ladrillo de barro algunas veces mezclada con paja y moldeada para formar los tabiques, este sistema constituye uno de los materiales más antiguos utilizados en América Latina, el cual tiene la propiedad de ser frágil por lo cual es incapaz de desarrollar ductilidades que le permitan asimilar algún nivel de deformación después de llegado al punto de fluencia por lo que su falla es frágil.

Al igual que todos los tipos de mampostería, la ductilidad es proporcionada por elementos que puedan brindarle propiedades de deformación, por ejemplo el acero de refuerzo colocado en el confinamiento del tabique macizo o el refuerzo interior del bloque

de concreto. Sin embargo, la característica principal del adobe es el factor económico y si se incluyen elementos que impliquen elevar el costo, éste pierde su sentido de utilización.

El adobe está sometido al intemperismo que afecta la calidad y el desempeño de todo el conglomerado de mampuestos. El sol en combinación con el agua del medio ambiente provoca que en el material se formen pequeñas fisuras a consecuencia de la contracción y dilatación del material, que con ese ciclo llega a tener deformaciones permanentes que alteran el comportamiento mecánico del mismo.

Otro factor que afecta el desempeño, es la vegetación que crece en la estructura. Las raíces de las plantas pueden provocar también fisuras o cargas extras al muro construido con adobe.

La falta de mantenimiento de estructuras de adobe disminuye su resistencia, por lo cual cuando es demandada por las acciones sísmicas las estructuras tienen daños importantes.

Como a toda estructura, la geometría de la planta representa un vértice importante en el comportamiento sísmico de la misma, debido a que si es muy alargada, puede generar deformaciones excesivas en el lado más largo por la flexibilidad del sistema de piso.

Las viviendas de adobe de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, tienen una planta rectangular con pocos o nulos muros interiores que proporcionen rigidez lateral a la estructura en el lado más largo.

La Figura 4-34 muestra una planta típica de una vivienda de adobe de bajos recursos económicos, las cuales serán tomadas como tipo sin incluir las viviendas de adobe antiguas, que representan monumentos históricos, patrimonios culturales, etc. En estas últimas la distribución en planta es más elaborada y con materiales de construcción, técnica de mejor calidad que la utilizada en la actualidad.

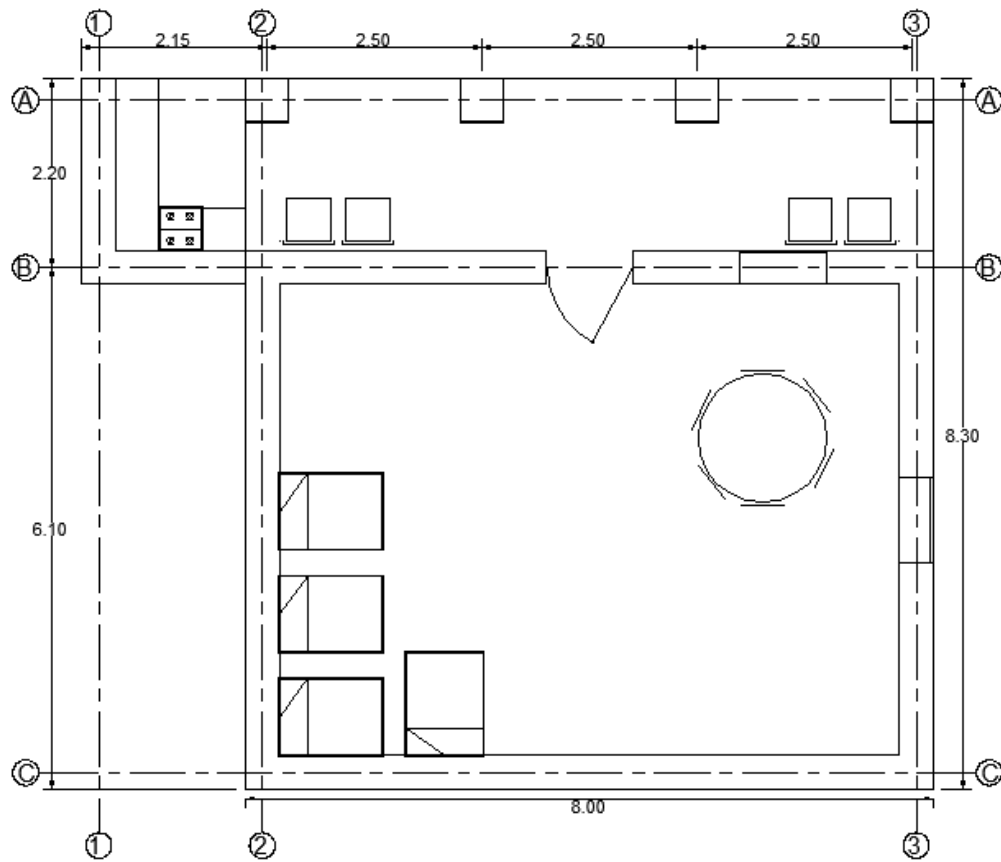


Figura 4-34 Planta de vivienda tipo de Adobe en El Salvador

La vivienda rural de adobe consta de un área interior muy amplia donde se distribuyen los espacios de una vivienda. Estos espacios, en la mayoría de ocasiones son separados por elementos no estructurales, por ejemplo cortinas, divisiones improvisadas por mobiliario, etc. Además, se le suma generalmente un pasillo frontal, una cocineta como apéndice de la vivienda, y el área sanitaria que es una letrina separada de la vivienda.

En las Figura 4-35 y

Figura 4-36 se propone una cimentación como la que establece el apéndice de Adobe de la Norma Especial para Diseño y Construcción de Viviendas, Sección 4.1.2. La cimentación es de mampostería de piedra con un aglomerante de mortero 1:3 cuyo ancho es 1.5 veces el ancho de la pared, con una profundidad de 60cm.

Se incluye de una sobrecimentación de 40 cm para la protección del adobe contra el intemperismo, por ejemplo la lluvia, calor excesivo de sol que le roba la humedad a la pieza incidiendo en mayor rigidización y fragilidad como elemento.

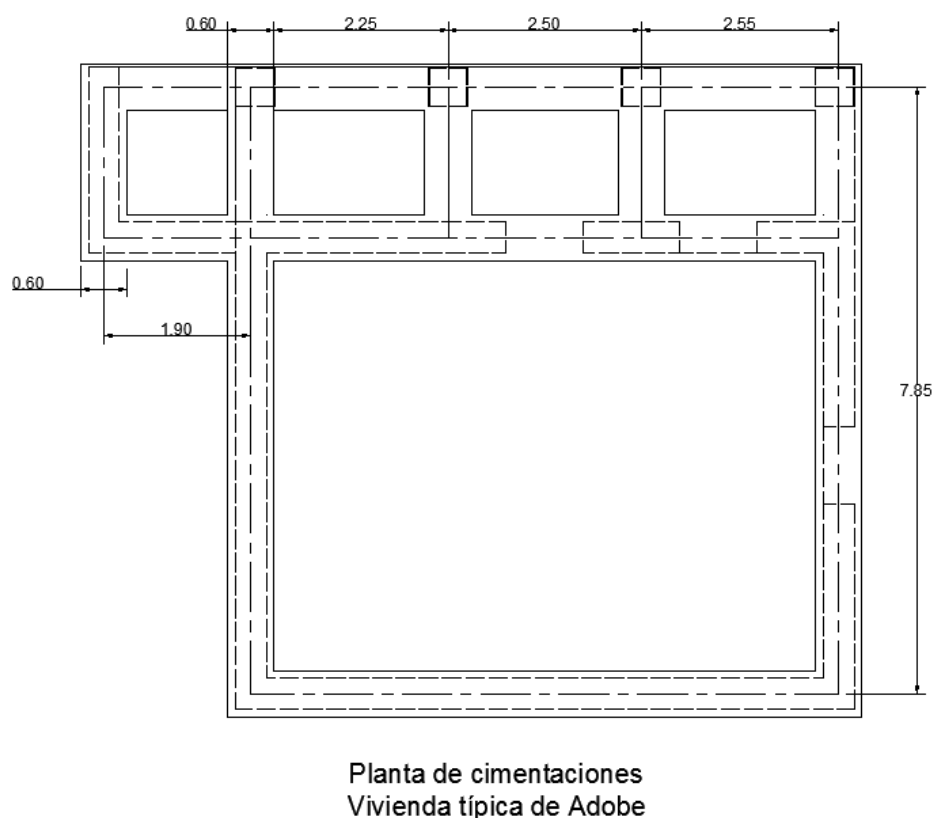


Figura 4-35 Planta de cimentación de vivienda de Adobe

El sistema de techo está compuesto por vigas principales de madera de sostén principal. La estructura secundaria a base de polines y la cubierta compuesta por teja de barro artesanal.

A pesar que el adobe es utilizado en muchos países de Latinoamérica y el segundo material de construcción más utilizado en El Salvador, los estudios de curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daños son escasos en comparación con la mampostería y el concreto. Por lo tanto, para este estudio se toma como referencia la investigación “Evaluación del Riesgo Sísmico en residencias del Área Metropolitana de San José en función de pérdidas de vidas humanas”, (Salas Alvarado, 2003).

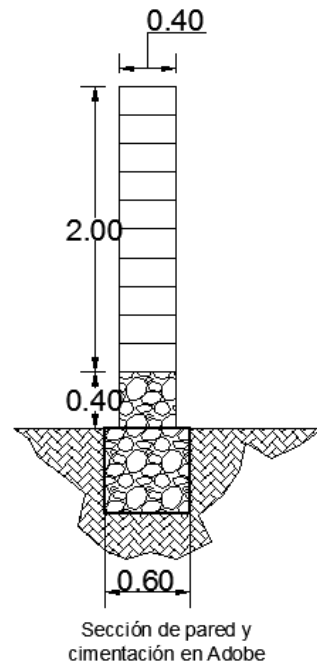


Figura 4-36 Sección transversal de pared y cimentación de vivienda de Adobe

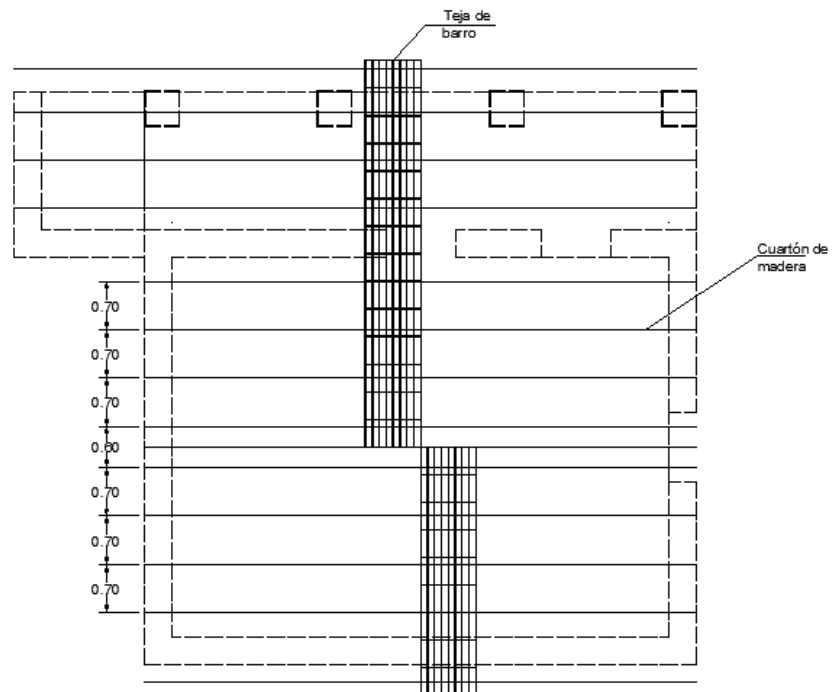


Figura 4-37 Planta de techo de vivienda de Adobe

La realidad económica de Costa Rica es diferente a la de El Salvador, sin embargo el entorno de peligro sísmico son de mucha similitud entre ambos, además, la cultura social es parecida por lo que las estructuras se puede concluir que son de similares condiciones.

En el estudio se proponen curvas de fragilidad, FDM, para diferentes materiales de construcción, clasificados de acuerdo a la fragilidad o flexibilidad propia de cada uno de ellos, Figura 4-38.

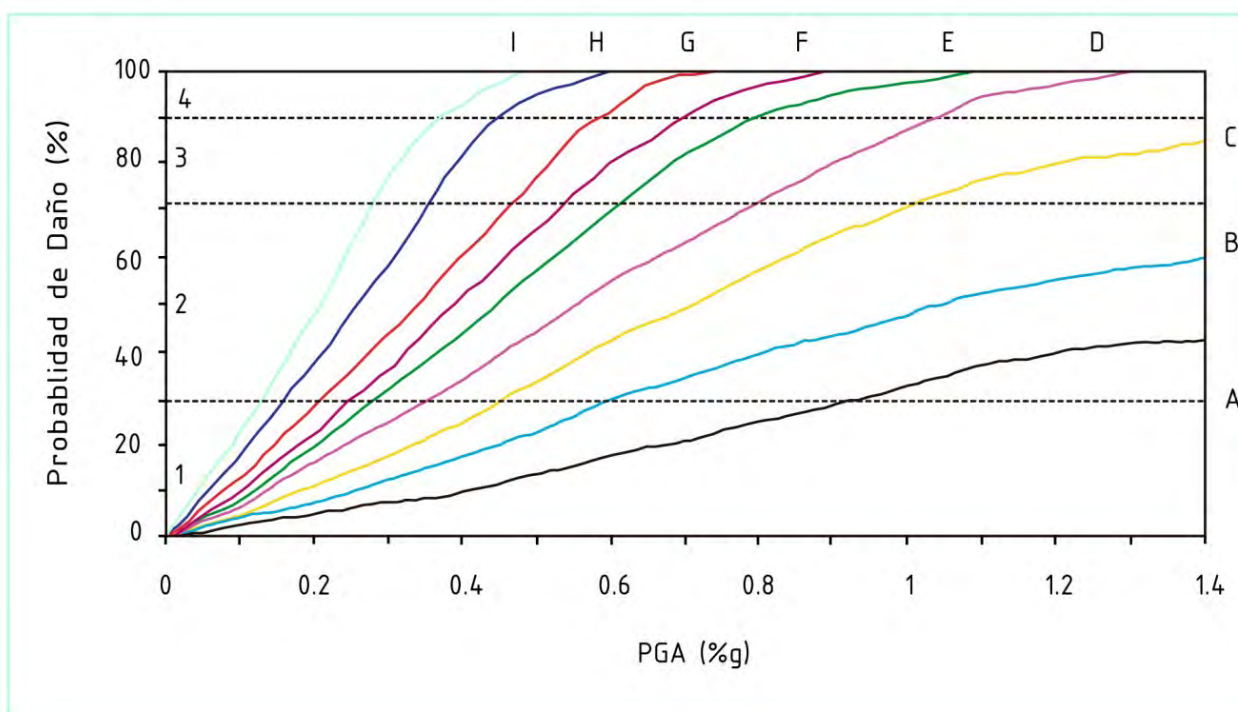


Figura 4-38 Curvas de fragilidad utilizadas para Costa Rica

El estudio muestra 9 curvas que representan el Factor de Daño Medio para diferentes ductilidades que pueda desarrollar el sistema constructivo que se utiliza. La curva A, representa materiales muy dúctiles como la madera y la curva I, los materiales frágiles que sufren daño ante excitaciones sísmicas pequeñas, como el adobe.

Los número 1,2,3 y 4 que se muestran en el eje vertical representan el estado de daño que puede tener la estructura. Donde el 1 representa el nivel de daño: ninguno, leve y moderado, es decir desde la ausencia hasta un daño menor. El número 2 significa un daño Extensivo, es decir con importantes deterioros en la estructura hasta el grado de

representar una amenaza a la vida. El número 3 representa un colapso parcial en el cual la estructura ve comprometida la estabilidad estructural y pequeñas partes del edificio han colapsado. Y finalmente el número 4 es el colapso total de la estructura.

Las curvas se pueden interpretar de la siguiente manera: para la curva I, ante una excitación sísmica que representa una $PGA = 0.4g$, aproximadamente el 98% de las estructuras están en colapso total. Otro ejemplo, si se toma la curva B, para el mismo evento de un $PGA = 0.4g$, aproximadamente el 20% de las estructuras tendrían hasta un daño menor.

Otro estudio consultado es el realizado en la República de Nicaragua, expuesto en la revista científica “NEXO” en mayo de 2010 y realizado por Ugarte de la Universidad Nacional de Ingeniería de Nicaragua, Figura 4-39. En esta propuesta, se tiene 4 estados de daño, ligero, moderado, extensivo y completo. Sus parámetros sísmicos están dados en Pseudodesplazamientos (mm) y un porcentaje de probabilidad de daños.

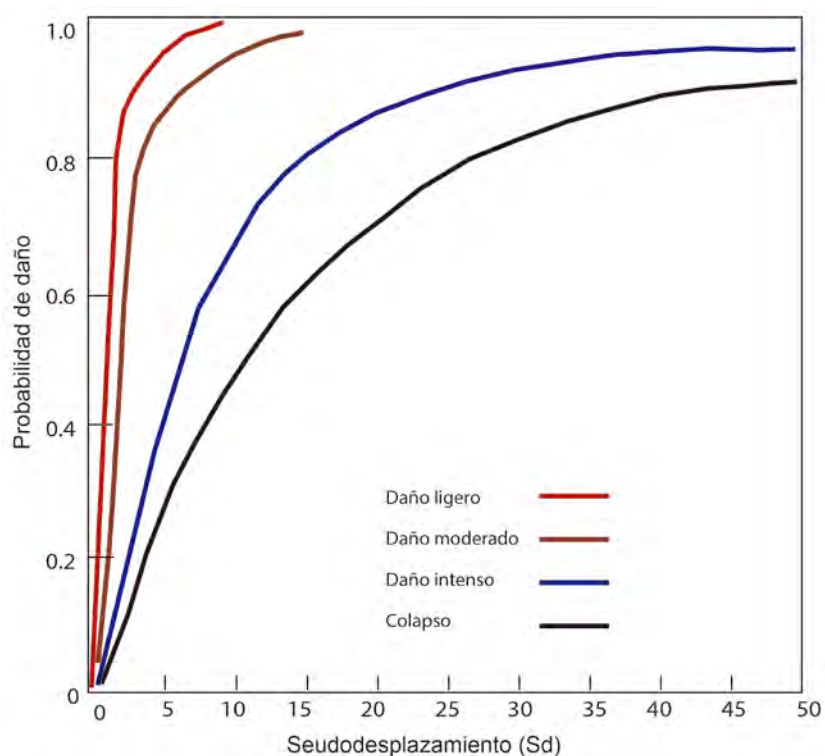


Figura 4-39 Curva de fragilidad para Adobe, Nicaragua

La curva de fragilidad propuesta para El Salvador, se tomará como la curva I, (Salas Alvarado, 2003) ya que esta representa a los materiales frágiles y con poca o nula ductilidad. Por lo que la curva de fragilidad para construcciones de adobe en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, se propone de acuerdo a la Figura 4-40.

La curva muestra el FDM para cada estado de daño y para cada porcentaje de la aceleración de la gravedad, denotando un alto grado de fragilidad del material ya que el colapso total se presenta cuando el PGA es de 0.35g aproximadamente.

Este valor es congruente con los colapsos presentados en El Salvador debido a que el valor pico alcanzado es de 0.4g cuando la mayoría de viviendas de adobe colapsan o tienen un grado de daño grave. Para la construcción de viviendas con Adobe, solo se presenta un tipo de curva de fragilidad pues todo tipo de construcción con este material se denotó como vulnerable, sin hacer la distinción del año de construcción, ubicación de la vivienda, etc. Factores que si influyeron en el análisis de la mampostería.

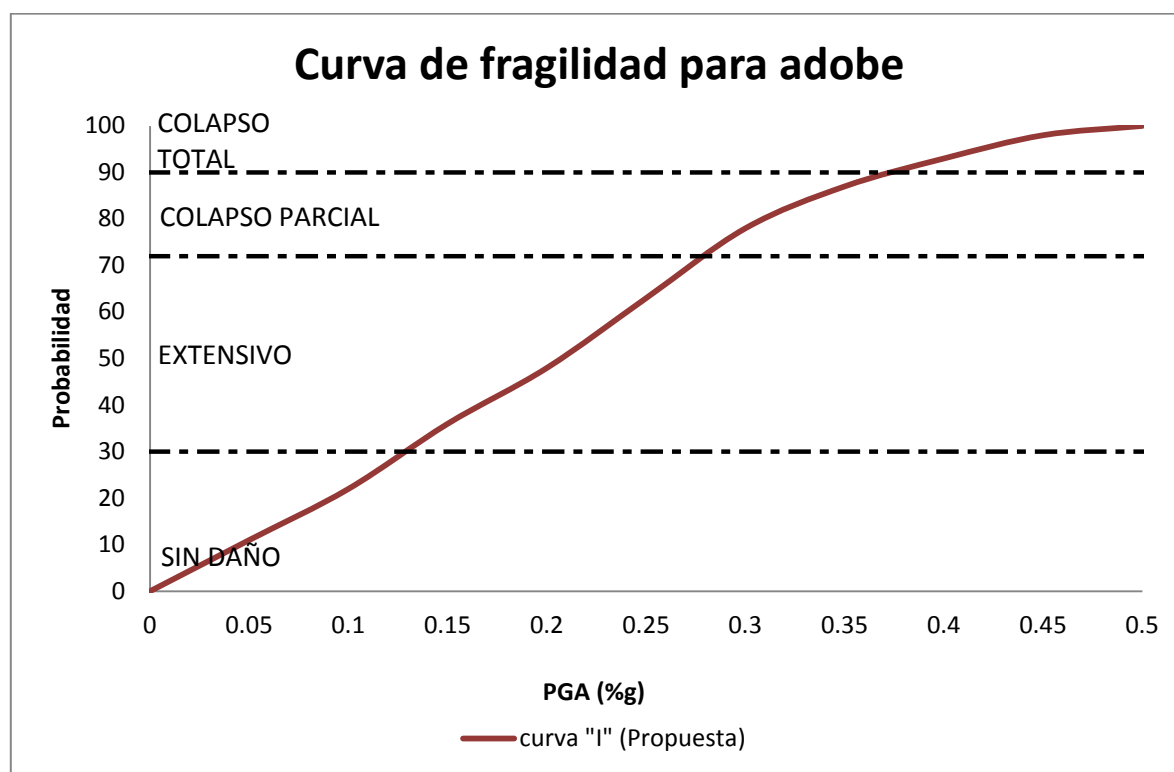


Figura 4-40 Curva de fragilidad para construcciones de Adobe en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

4.5.3. Bahareque

En El Salvador no existe ningún documento legal que respalde y garantice una adecuada construcción para viviendas construidas con bahareque, sin embargo hay muchas investigaciones que proponen un diseño sismorresistente que mejora notablemente el comportamiento de este material ante fuerzas laterales. Como se dijo con el adobe y la mampostería, debe existir un sistema que le proporcione cierto grado de ductilidad a la estructura para mejorar sus características.

El bahareque es un material frágil y al igual que el adobe no es capaz de desarrollar valores de ductilidad altos, por lo que no acepta deformaciones considerables, en la Figura 4-41 se muestra una propuesta de cimentación para una vivienda de bahareque en donde de manera similar al adobe, se recomienda una sobrecimentación e importante protección a la base de las paredes.

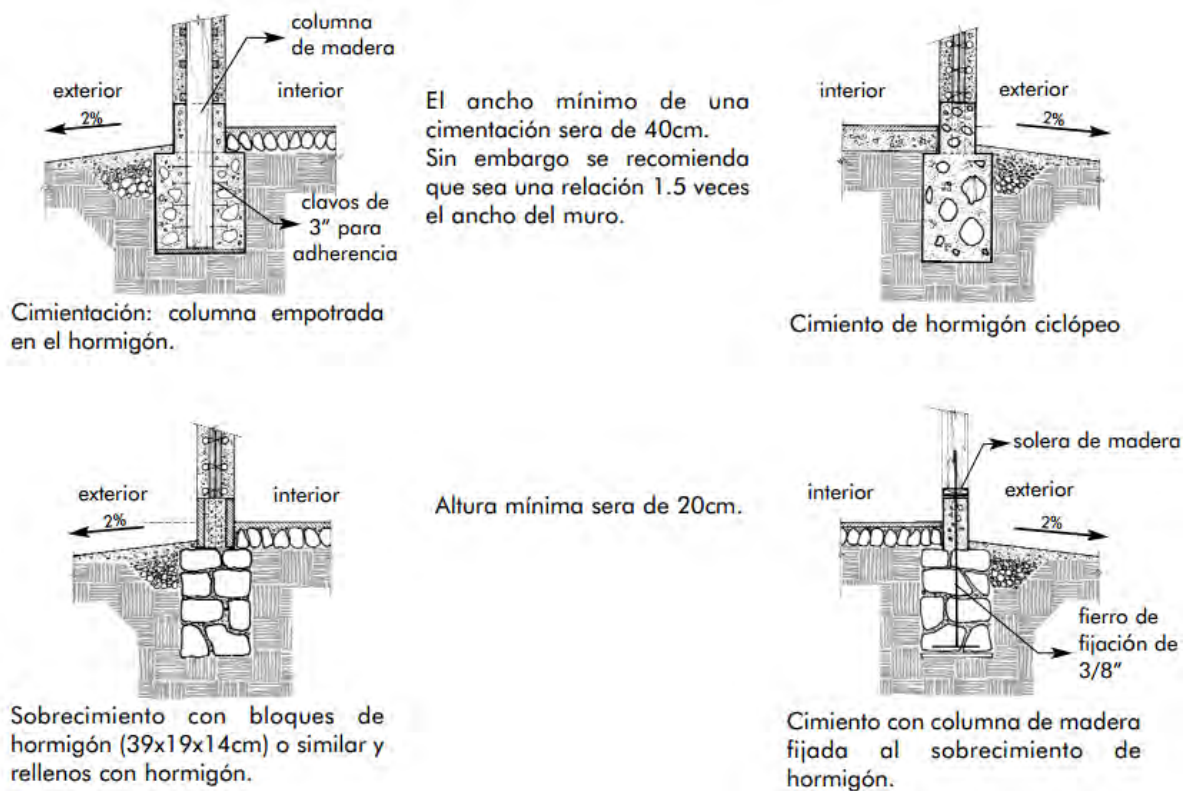


Figura 4-41 Propuesta de cimentaciones para viviendas de bahareque. Fuente: Bahareque, Guía de Construcción Parasísmica. Carazas y Rivero, 2002.

Las acciones del intemperismo, por ser un material degradable, son críticas para las viviendas. Por ejemplo, el exceso de agua provoca desgaste de las paredes ya que hay desprendimiento de las piezas y provoca erosión en los muros, el excesivo calor provoca la pérdida de humedad que incita que los muros se vuelvan frágiles, la presencia de termitas en las varas de refuerzo debilita excesivamente la estructura, por lo que un mantenimiento constante y de buena calidad es crucial para este tipo de viviendas.

El comportamiento estructural de las viviendas de bahareque tiene una tendencia muy parecida al comportamiento de viviendas construidas con adobe; la configuración de las viviendas con ambos materiales es muy similar; la estructuración es, de igual forma, parecida, por lo tanto, para efectos de este estudio se tomó la misma curva de fragilidad para el bahareque, Figura 4-40.

4.5.4. Madera, Cartón, Desechos y demás materiales utilizados en la construcción de viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

En la sección 4.2 y 4.4 se hizo mención de los materiales de construcción más comunes en El Salvador, de los cuales la mampostería, adobe y bahareque son los más representativos con el 98% del total de viviendas; por lo que los demás materiales como madera, lámina, vegetales, paja, desechos, etc., constituyen entre todos el 2% por tanto, no se proponen curvas de fragilidad ni matrices de probabilidad de daños para éstos. Además, que por el mismo concepto de la vivienda de este tipo de material se tomarán como meramente vulnerables debido a que el desarrollo de los mismos se da en lugares catalogados como de riesgo, ya que son viviendas de la población de escasos recursos.

En cuanto a la madera como material de construcción, existen estudios donde se propone un MPD, (Applied Technology Council, 1985); sin embargo, el tipo de estructura existente en los Estados Unidos difiere totalmente a la construcción desarrollada en El Salvador Figura 4-42, tanto en calidad de materiales como en el concepto de la vivienda, por lo que no se toma como referencia para este apartado.



Figura 4-42 Vivienda de madera, El Salvador. Fuente: Wordpress. Cita de internet, JorgeAvaloswordpress

Capítulo 5 Vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador

Los poblados de la Zona Central y Paracentral se agrupan en departamentos, municipios, ciudades grandes, ciudades pequeñas, pueblos, etc. Este título depende del desarrollo económico y social de la localidad, esto según la Ley de Distinciones Honoríficas, Gratificaciones y Títulos de El Salvador (Gobierno de El Salvador, 2012).

Para este estudio, se toma como referencia el número de habitantes por municipio para dividirlo en cuatro grupos, Tabla 5-1 para poder aplicar los criterios de las curvas de fragilidad correspondientes.

Tabla 5-1 Clasificación de los poblados de acuerdo al número de habitantes

Clasificación	No. Habitantes
ciudades grandes	400,000 - 100,000
ciudad pequeña	99,999 - 50,000
pueblo	49,999 - 10,000
cantón	9999 - 1

La clasificación de los poblados es útil para determinar a groso modo el desarrollo de la localidad, el poder adquisitivo de los pobladores, además se estudió superficialmente las actividades principales de los municipios y economía de cada uno de ellos, ver Anexo en Sección 0.

El peligro sísmico, la ubicación geográfica, la formalidad de la construcción, la calidad de los materiales utilizados, son entre otros factores que influyen en las características propias de cada estructura por separado, por tanto, se clasifican los poblados para poder englobar todas las características propias de cada una y llevarlas a un punto en que se pueda analizar el conglomerado.

La calidad de las construcciones varía dependiendo de la localidad, el desarrollo económico de la población, el ordenamiento territorial de los poblados, la proyección del crecimiento de las comunidades, entre otros factores, como se determinó en la Sección 4.5, donde se plantean las diferentes matrices de probabilidad de daños y curvas de fragilidad.

Por lo que en este capítulo se plantearán escenarios sísmicos a los que podría estar sometidas las viviendas en la Zona Central y Paracentral, abordando los materiales: mampostería, adobe y bahareque, como se planteó en el final del Capítulo 4.

5.1. Escenarios sísmicos

La vulnerabilidad sísmica de la Zona Central y Paracentral de El Salvador se evidencia cuando ocurre algún movimiento telúrico; por lo que deben imponerse escenarios sísmicos para evidenciar la cantidad y el grado de los daños producidos por las diferentes intensidades que puedan ocurrir ante un sismo.

En esta sección se toman las curvas de fragilidad propuestas para cada tipología de viviendas planteadas en el capítulo anterior bajo la acción de un escenario sísmico ficticio, impuesto con el fin de comprobar el grado de daños y la magnitud de la devastación ocurrida ante algún evento importante.

Se proponen dos escenarios sísmicos en los cuales se utilizó la propagación de las isosistas ocurridas en eventos históricos, bajo la suposición que la distribución será de igual manera ante la magnitud que se eligió para plantear los escenarios sísmicos.

Se plantearon dos escenarios; el primero, un gran sismo, con intensidades desde V hasta XII, cuyo epicentro es en el departamento de San Salvador y es provocado por una falla local, similar al ocurrido en el sismo de 1986; y el segundo un sismo de magnitud considerable, cuyas intensidades varían desde V hasta VII, este sismo tiene su epicentro en el Océano Pacífico y es provocado por la subducción de las placas de Coco y del Caribe; Tabla 5-2.

Tabla 5-2 Escenarios sísmicos utilizados

Escenarios sísmicos	Intensidades (MMI)
Escenario I	XII
	XI
	X
	IX
	VIII
	VII
	VI
	V
Escenario II	VII
	VI
	V

Se tomaron dos escenarios hipotéticos ya que son provocados por diferentes fuentes y entre ambos abarcan toda la escala de intensidades presentada para las estructuras, por lo que aunque se varíe el sismo, los resultados serían repetitivos. En resumen, en la Figura 5-1 y Figura 5-2 se muestran las curvas de fragilidad con las que se trabajará para determinar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras ante los dos escenarios propuestos.

Con todo lo expuesto, se procede a calcular la vulnerabilidad sísmica de las viviendas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, analizando únicamente la mampostería, el adobe y bahareque que son los materiales predominantes.

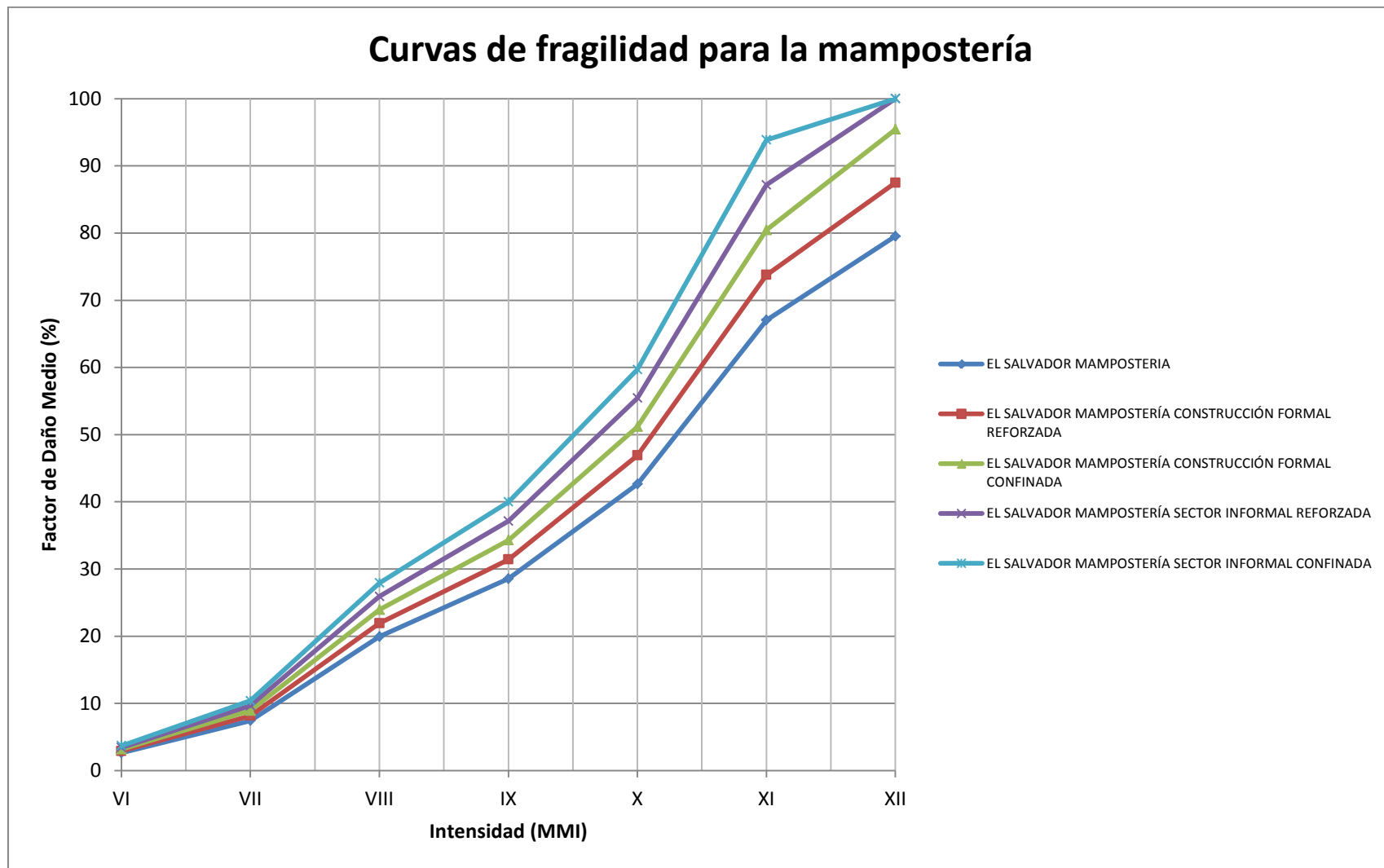


Figura 5-1 Curvas de fragilidad para la mampostería de baja altura de acuerdo al tipo de construcción

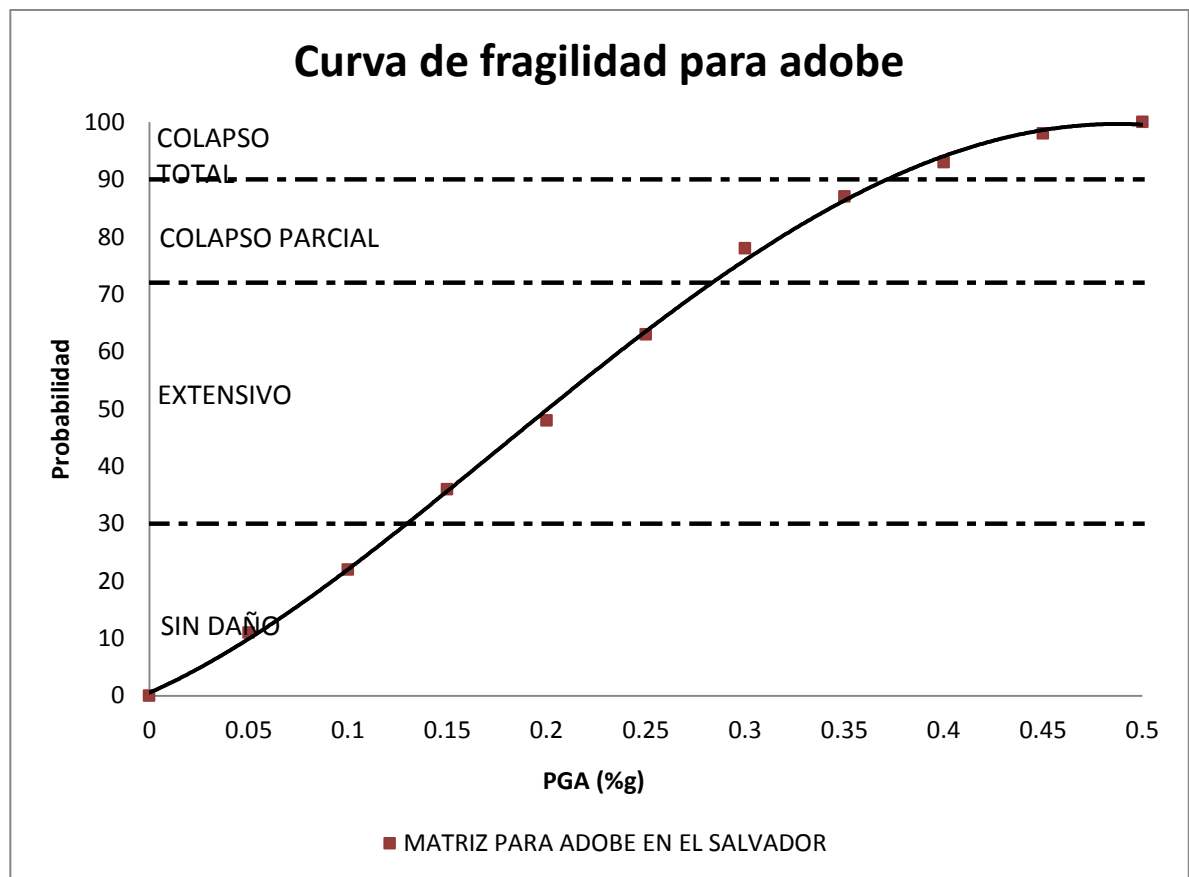


Figura 5-2 Curva de fragilidad para Adobe y Bahareque

5.2. Resultados

El análisis de la vulnerabilidad sísmica en la zona Central y Paracentral de El Salvador, se realizó con la matriz de probabilidad de daños propuesta para la mampostería sin la distinción de construcción formal e informal pues no se cuenta con los datos requeridos para poder realizarlo.

En la Figura 5-3 se presenta un sismo de falla local, cuyo epicentro se sitúa en la ciudad de San Salvador, similar condición a la ocurrida en el sismo de 1986. En el sismo impuesto se desarrollan intensidades de XII hasta V en MMI y se hizo la hipótesis que las isosistas del sismo serían las mismas que las ocurridas en 1986; sin embargo, se sabe que esto no necesariamente ocurrirá de esta manera en un evento real.

En el mapa se observa que los municipios más afectados son los más cercanos al epicentro sin embargo, la ciudad de San Salvador a pesar de estar directamente situada en el evento los colapsos no son del 100%; esto no excluye grandes pérdidas pues los daños representan un cifra alrededor del 75% de las viviendas en situación de colapso. En las Tabla 5-3, Tabla 5-5, Tabla 5-6, Tabla 5-7, Tabla 5-8, Tabla 5-9 y Tabla 5-10 se muestran los resultados del total de viviendas dañadas ante las diferentes intensidades del sismo impuesto.

Tabla 5-3 Viviendas dañadas en el departamento de Cabañas

Municipio	Intensidad	Número de viviendas dañadas
Sensuntepeque	V - VI	222
Cinquera	VIII	1302
Dolores	VI	32
Guacotecti	VI	31
Ilobasco	VII - IX	5494
Jutiapa	VII	127
San Isidro	VII	184
Tejutepeque	VIII	405
Victoria	V	0
TOTAL		7797

Tabla 5-4 Viviendas dañadas en San Vicente

Municipios	Intensidad	Viviendas dañadas
Apastepeque	VIII	1197
Guadalupe	IX	573
San Cayetano Istepeque	VIII	369
San Esteban Catarina	VIII	396
San Ildefonso	VII	212
San Lorenzo	VIII	445
San Sebastián	VIII	1007
San Vicente	VIII	2760
Santa Clara	VII	143
Santo Domingo	VIII	469
Tecoluca	VIII	478
Tepetitán	VIII	252
Verapaz	IX	749
TOTAL		9050

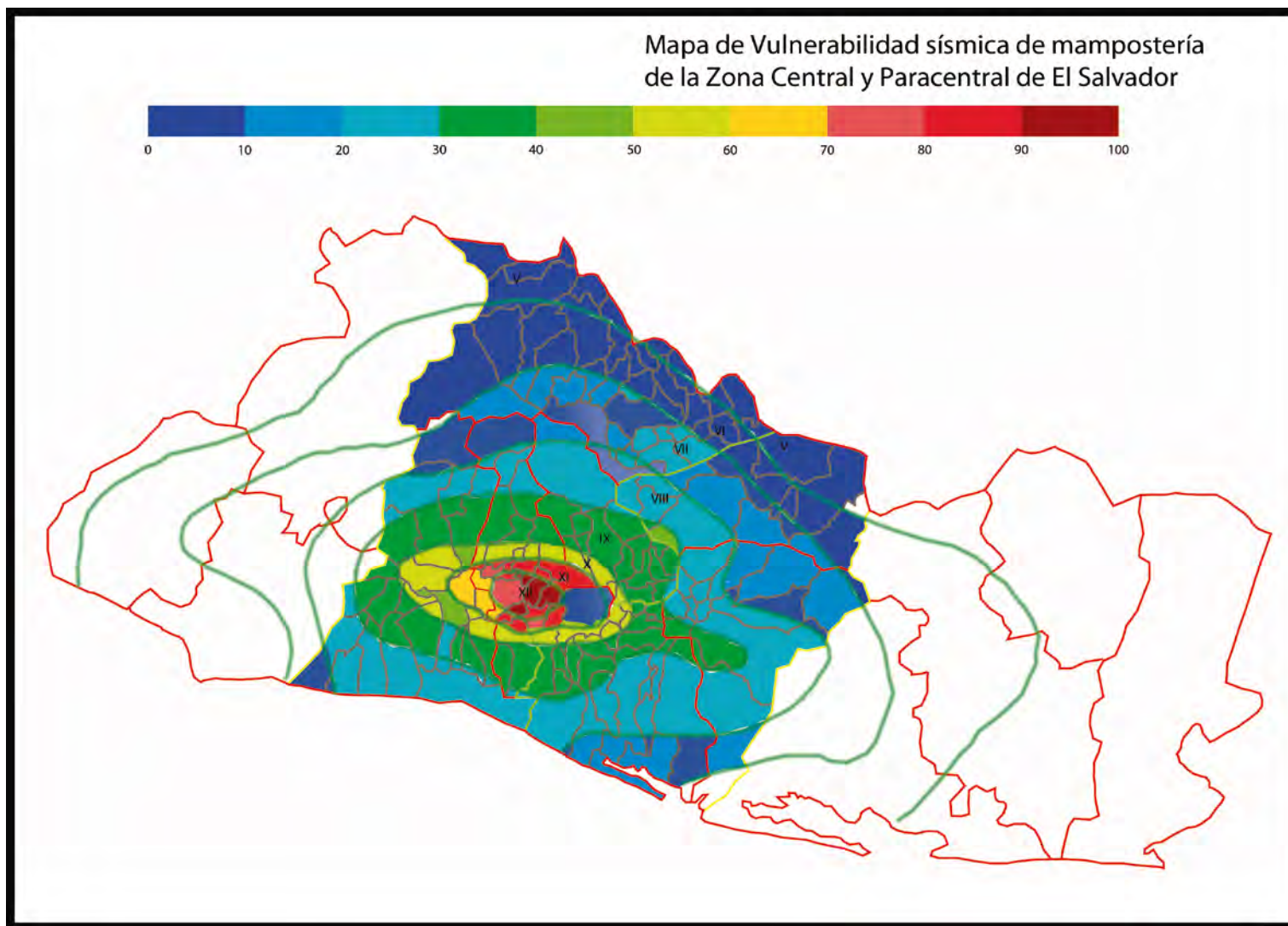


Figura 5-3 Vulnerabilidad sísmica de la mampostería en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

Tabla 5-5 Viviendas dañadas en Chalatenango

Municipios de Chalatenango	Intensidad	Viviendas Dañadas
Agua Caliente	V	0
Arcatao	V	0
Azacualpa	VII	24
Cancasque	VI	8
Chalatenango	V	0
Citalá	V	0
Comalapa	V	0
Concepción Quezaltepeque	V	0
Dulce Nombre de María	V	0
El Carrizal	V	0
El Paraíso	VII	207
La Laguna	V	0
La Palma	V	0
La Reina	V	0
Las Flores	V	0
Las Vueltas	V	0
Nombre de Jesús	V	0
Nueva Concepción	V	0
Nueva Trinidad	V	0
Ojos de Agua	V	0
Potonico	V	0
San Antonio de la Cruz	V	0
San Antonio los Ranchos	VII	29
San Fernando	V	0
San Francisco Lempa	V	0
San Francisco Morazán	V	0
San Ignacio	V	0
San Isidro Labrador	V	0
San Luís del Carmen	V	0
San Miguel de Mercedes	VII	41
San Rafael	VII - VI	191
Santa Rita	VII - VI	278
Tejutla	VII	525
TOTAL		1,304

Tabla 5-6 Viviendas dañadas en Cuscatlán

Municipios de Cuscatlán	Intensidad	Viviendas dañadas
Candelaria	IX	905
Cojutepeque	IX	924
El Carmen	IX	1,176
El Rosario	IX	421
Monte San Juan	IX	859
Oratorio de Concepción	IX	395
San Bartolomé Perulapía	IX	832
San Cristóbal	IX	679
San José Guayabal	IX	987
San Pedro Perulapán	IX	4,246
San Rafael Cedros	IX	1,628
San Ramón	IX	611
Santa Cruz Analquito	IX	281
Santa Cruz Michapa	IX	1,171
Suchitoto	VIII	1,113
Tenancingo	IX	842
TOTAL		17,070

Tabla 5-7 Viviendas dañadas en La Libertad

Municipios de La Libertad	Intensidad	Viviendas Dañadas
Antiguo Cuscatlán	XI	77,210
Chiltiupán	VIII	800
Ciudad Arce	IX	7,555
Colón	X	18,986
Comasagua	IX	1,420
Huizucar	VIII	968
Jayaque	IX	1,307
Jicalápa	VIII	836
La Libertad	VIII	2,850
Nuevo Cuscatlán	XI	717
Quezaltepeque	X	7,165
Sacacoyo	IX	1,478
San José Villanueva	VIII	960
San Juan Opico	X	984
San Matías	VIII	547
San Pablo Tacachico	VII	533
Santa Tecla	XI	25,475

Municipios de La Libertad	Intensidad	Viviendas Dañadas
Talnique	IX	975
Tamanique	IX	943
Teotepeque	VIII	854
Tepecoyo	IX	1,627
Zaragoza	VIII	578
TOTAL		154,769

Tabla 5-8 Viviendas dañadas en La Paz

Municipios de La Paz	Intensidad	Viviendas Dañadas
Cuyultitán	IX	752
El Rosario	VIII	1,507
Jerusalén	IX	352
Mercedes la Ceiba	IX	101
Olocuilta	IX	3,654
Paraíso de Osorio	IX	357
San Antonio Masahuat	IX	512
San Emigdio	X	416
San Francisco Chinameca	X	1,137
San Juan Nonualco	VIII	1,419
San Juan Talpa	VIII	1,425
San Juan Tepezontes	IX	472
San Luís La Herradura	VII	660
San Luís Talpa	VIII	1,795
San Miguel Tepezontes	X	816
San Pedro Masahuat	IX	3,710
San Pedro Nonualco	IX	1,104
San Rafael Obrajuelo	VIII	655
Santa María Ostuma	IX	1,095
Santiago Nonualco	VIII	2,874
Tapalhuaca	IX	601
Zacatecoluca	VIII	4,958
TOTAL		30,373

Tabla 5-9 Viviendas Dañadas en San Salvador

Municipios de San Salvador	Intensidad	Viviendas dañadas
Aguilares	VIII	1,764
Apopa	X - IX	28,141
Ayutuxtepeque	XI	9,021
Cuscatancingo	XII	17,617
Delgado	XI - X	55,285
El Paisnal	VII	428
Guazapa	VIII	1,899
Ilopango	XII	29,261
Mejicanos	XI - XII	39,183
Nejapa	X - IX	36,904
Panchimalco	IX - X	6,703
Rosario de Mora	IX	2,386
San Marcos	XII	14,912
San Martín	XI - IX	19,022
San Salvador	XII	93,153
Santiago Texacuangos	XI	2,772
Santo Tomas	XII	5,870
Soyapango	XII	66,505
Tonacatepeque	IX	64,936
TOTAL		495,762

En la Tabla 5-10 se presenta el total de viviendas con daño en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, con un sismo de intensidades desde V hasta XII en MMI, que representa el 75% de las viviendas con daño que puede fluctuar desde muy leve hasta el colapso.

Aproximadamente 716,125 viviendas fueron dañadas luego de un sismo de intensidad considerable lo cual implica que al menos el mismo número de familias serán gravemente afectadas. Al tomar un promedio de 4 habitantes por vivienda (Dirección General de Estadísticas y Censos, 2008), se tiene que un total de 2.8 millones de personas serán damnificadas.

Tabla 5-10 Viviendas dañadas en la Zona Central y Paracentral de El Salvador ante un sismo con un rango de intensidades [XII - V]

Departamento	Total de Vivienda
La Libertad	154,769
San Salvador	495,762
Chalatenango	1,304
Cabañas	7,797
La Paz	30,373
Cuscatlán	17,070
San Vicente	9,050
TOTAL	716,125

Con respecto al adobe, se presenta la Figura 5-4, donde se observa que éste es sustancialmente más vulnerable lo que provoca mayor cantidad de colapsos en las viviendas; el escenario sísmico es el mismo que se presentó en la mampostería.

Al realizar el mismo análisis para el adobe, se tiene la Figura 5-4, en la cual se muestra que ante un sismo de estas intensidades, más del 90% de viviendas presentan daños importantes y colapsos parciales, lo que representa un total de 117,513 viviendas y 470,052 personas damnificadas.

En conjunto, los daños provocados por un sismo con las características de intensidad y de propagación como el planteado anteriormente, dejará un total de 833,500 viviendas dañadas y 2.9 millones de salvadoreños sin hogar. La tabulación de los datos se muestra en el anexo digital del estudio.

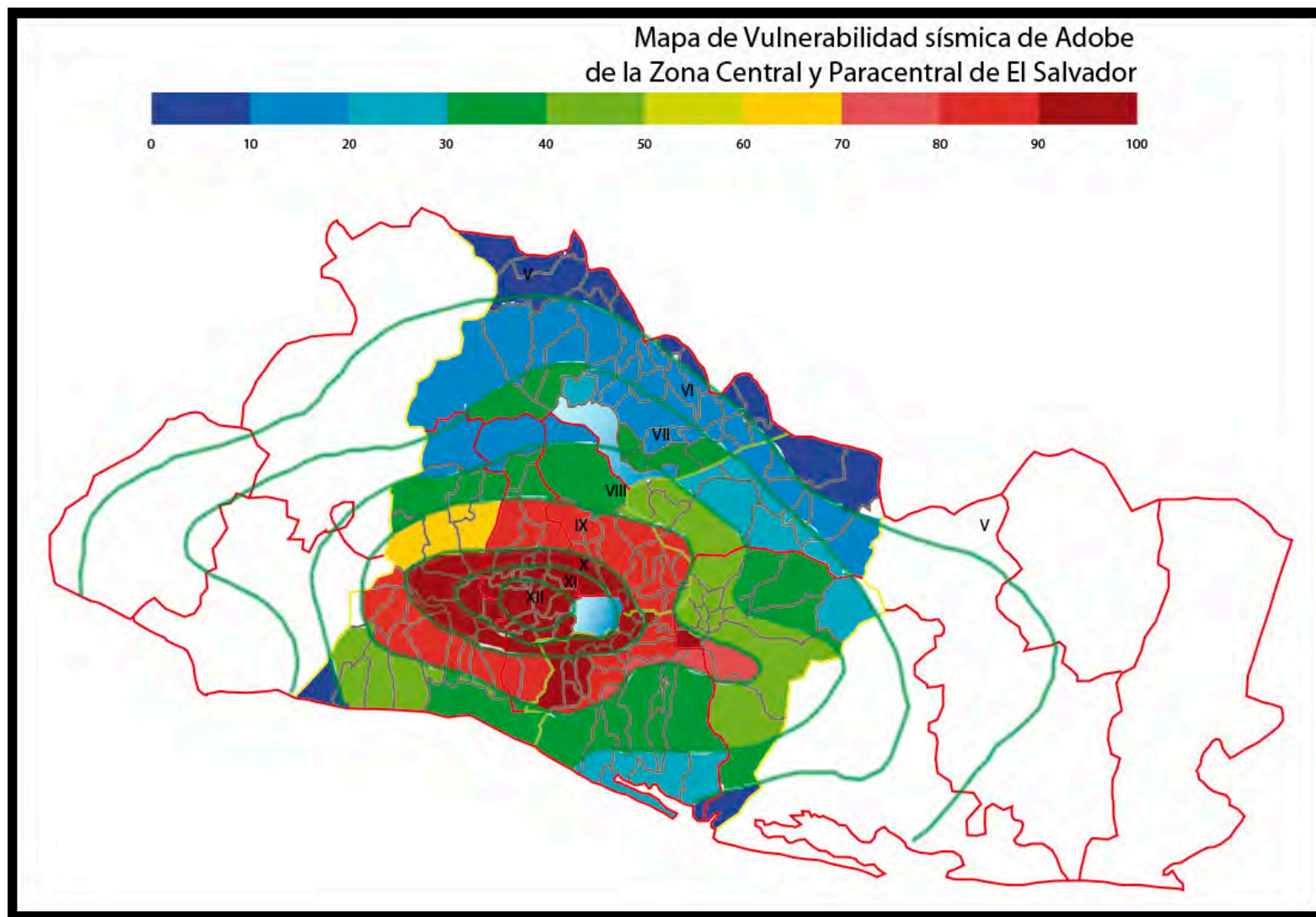


Figura 5-4 Mapa de Vulnerabilidad sísmica del Adobe en la Zona Central y Paracentral de El Salvador

Las intensidades presentadas están en un intervalo de V hasta XII en Mercalli Modificada, siendo el epicentro en la ciudad de San Salvador. Las curvas que reflejan el colapso total de las viviendas se propagan en mayor área debido al comportamiento del adobe; en el anexo 4 se muestra la equivalencia de PGA y escala de MMI.

El segundo escenario plantea como un sismo de menor intensidad; el porcentaje de las pérdidas disminuye sustancialmente, hasta un rango del 10% del total de viviendas de mampostería, Figura 5-5.

Las tendencias de los daños ante diferentes escenarios sísmicos muestran que el problema se incrementa a partir de intensidades de VII tanto para el adobe como para la mampostería.

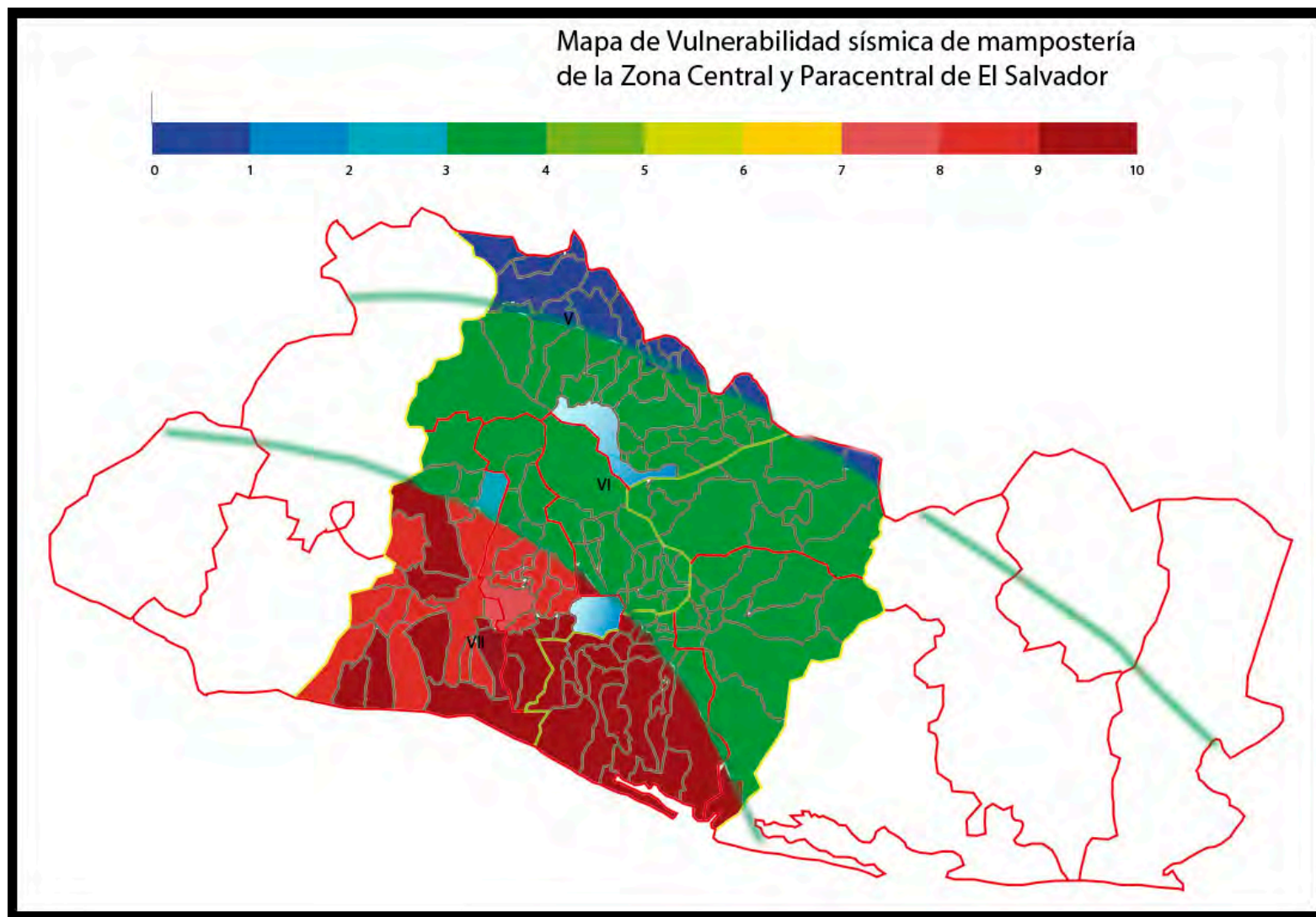


Figura 5-5 Mapa de vulnerabilidad sísmica de mampostería de la Zona Central y Paracentral de El Salvador, escenario 2

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

A partir de la investigación y estudio realizado en la Zona Central y Paracentral de El Salvador, se presentan las siguientes conclusiones:

- El Salvador es un país ubicado en una zona altamente sísmica debido a la conjunción de varios factores como fallas locales, frecuente actividad volcánica, influencia de la zona de subducción de la placa de Cocos y la del Caribe.
- Históricamente, las principales ciudades de El Salvador han sido destruidas en repetidas ocasiones por sismos de moderada y alta magnitud lo que implica grandes pérdidas económicas y humanas en el país.
- El Salvador es el país con mayor densidad demográfica en Centroamérica con 267 hab/km², lo cual provoca hacinamientos desproporcionados. Las necesidades básicas de la población como la vivienda digna en lugares seguros, son insatisfechas.
- La construcción en El Salvador en el sector vivienda tiene un porcentaje muy alto de informalidad. La mayoría de vivienda se construye bajo autoconstrucción en la cual no se siguen los reglamentos del país para realizarla.
- La mayor cantidad de viviendas se encuentran ubicadas en zonas urbanas, lo cual representa alrededor del 75% del total.
- Los materiales de construcción más utilizados en El Salvador son el tabique, bloque de concreto, adobe, bahareque, madera, lámina metálica, cartón y desechos; siendo mencionados en orden de mayor a menor, respectivamente.
- En 2001 ocurrieron dos eventos sísmicos intensos que dejaron pérdidas millonarias al país. Hubo colapsos en estructuras importantes como hospitales nacionales, escuelas,

la red vial, sin mencionar la gran cantidad de vivienda colapsada. Sin embargo, la Norma Especial para Diseño y Construcción de Viviendas y la Norma Especial por Sismo desde El Salvador datan de 1997.

- Es necesario una microzonificación sísmica de El Salvador que sea incluida en las normas y reglamentos de construcción.
- El adobe y bahareque a pesar de ser sistemas estructurales que no resisten los sismos, son repetidamente utilizados por la población para la construcción de la vivienda, principalmente rural, en la Zona Central y Paracentral de El Salvador. Esto se debe al bajo costo que implica la construcción con estos materiales.
- A pesar de los estudios realizados en El Salvador para utilizar un adobe mejorado, estabilizado y reforzado que sea sismorresistente, los métodos no son aplicados de manera generalizada en toda la población.
- El departamento más vulnerable de la Zona Central y Paracentral de El Salvador con respecto a los materiales de construcción es Chalatenango, con el 55% de viviendas construidas con materiales inadecuados para soportar un sismo de moderada intensidad.
- El departamento con menor porcentaje de vivienda vulnerable de la Zona Central y Paracentral de El Salvador es San Salvador, en el cual el 93% de viviendas están construidas con un sistema estructural capaz de resistir fuerzas laterales inducidas por un sismo.
- La información con la cual se realizó la investigación se tomó de los datos oficiales del último Censo de Población realizado en 2007, sin incluir las proyecciones de

crecimiento de la población; sin embargo, en los diferentes informes de la misma institución hay un rango de error en el cual los totales de viviendas no son las mismas.

- El estudio incluye únicamente vivienda unifamiliar de uno y dos niveles, no se consideran los edificios multifamiliares.
- Se presentan cinco matrices de probabilidad de daños para la mampostería reforzada y confinada que puede considerarse en la construcción de sector formal o informal. En la cual la tipología más vulnerable de las presentadas es la mampostería confinada construida en el sector informal, pues los confinamientos se colocan a distancias inadecuadas.
- El punto de quiebre de El Salvador inicia en sismos con intensidades de VIII en escala MMI en las cuales de acuerdo a las curvas de fragilidad propuestas la mampostería muestra un estado de daño alto.
- Si se tiene un sismo que produce intensidades de XII en la escala MMI con epicentro en el departamento de San Salvador, la cifra de damnificados sería aproximadamente un total de 2.9 millones de salvadoreños, donde se consideró como promedio 4 habitantes por vivienda.
- Un sismo que produce intensidad de XII con epicentro en el departamento de San Salvador, las viviendas construidas con adobe y bahareque colapsan en varios municipios de los departamentos de La Libertad, San Salvador, La Paz y Cuscatlán. El departamento de San Vicente, presenta daños importantes en las viviendas, sin embargo los colapsos serían pocos.
- La vulnerabilidad en el departamento de San Salvador, está más ligada a los asentamientos en lugares inestables (vulnerabilidad del entorno) que a la estructura

misma (vulnerabilidad física), ya que la construcción mayoritariamente la desarrollan empresas urbanizadoras que trabajan bajo supervisión gubernamental y reglamentaria. Sin embargo, estas colonias se desarrollan en sitios con riesgos de quebradas, deslizamientos, derrumbes, etc.

- La hipótesis planteada al inicio de la investigación que cita **“La Zona Central y Paracentral de El Salvador tiene un alto grado de vulnerabilidad ante sismos de moderada intensidad principalmente en las zonas más pobres de la región como son las construcciones rurales”**. Es cierta, pues se demostró que sismos de intensidades moderadas provocan daños importantes en un alto porcentaje de viviendas, aunque no el colapso.

6.2. Recomendaciones y Trabajos futuros

- A partir de la investigación realizada, se recomienda realizar una revisión exhaustiva de la normativa vigente en El Salvador para la construcción de viviendas ya que han ocurrido eventos sísmicos intensos que han dejado un número significativo de colapsos, lo que significa que hay factores que se deben revisar de los reglamentos.
- La presente investigación es solamente una introducción a los conceptos de vulnerabilidad y se proponen curvas de fragilidad y matrices de probabilidad de daño en base a países que han desarrollado investigaciones exhaustivas del tema, por lo que se recomienda dar inicio a una investigación más profunda en un área pequeña, ya que se requiere de una extensa información detallada de las estructuras para poder realizarla.
- Con respecto a la vulnerabilidad sísmica, se recomienda prestar principal atención a los departamentos de la Zona Paracentral de El Salvador, pues son los más vulnerables al estar sometidos a un peligro sísmico mayor.

- Agudelo C., J. A., & López Rodríguez, R. R. (2009). *Curvas de fragilidad para estructuras de pórticos de hormigón armado con paredes de mampostería. Caso de estudio: Estructuras de 1 y 2 niveles en Puerto Rico* (Vols. 9 (1 - 2)). Puerto Rico: Universidad de Mayagüez.
- Anagnos, T., Rojahn, C., & Kiremidjian, A. (1995). *NCEER-ATC Joint Study of Fragility of Buildings. Technical Report*. State University of New York at Buffalo.
- Applied Technology Council. (1985). *ATC - 13, Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Estados Unidos: Federal Emergency Managment Agency.
- Applied Technology Council. (Marzo de 2002). *ATC - 21, Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook*. Washington, D.C. , Estados Unidos : Federal Emergency Managment Agency.
- Arellano Méndez, E. (2005). *Vulnerabilidad Sísmica en Chilpancingo y la colonia Roma*. Ciudad Universitaria, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bernal, C. (2012). *Población de El Salvador en el 2013*. Recuperado el 24 de Febrero de 2013, de <http://www.elsv.info/poblacion-de-el-salvador-en-el-2013>
- Bommer, J. e. (1998). *Riesgo sísmico en la región metropolitana de San Salvador*. San Salvador.
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cardona A, O. D. (1993). *Mitigación de Desastres en las Instalaciones de la Salud - Volumen 4, Aspectos de Ingeniería*.

- Carvalho, F. A. (10 de febrero de 2010). *Ingeniería Sísmica y la Construcción Civil*. Recuperado el 01 de mayo de 2012, de <http://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.mx/2010/02/la-escala-mercalli-modificada.html>
- Chalatenango. (2010-2013). *Chalatenango, El Salvador*. Recuperado el junio de 2013, de <http://www.chalatenangosv.com/monografia-chalatenango>
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe, S. S. (2001). *El Salvador: Evaluación del terremoto del Martes 13 de febrero de 2001*. Mexico.
- Comisión Económica para América Latina y El Caribe, Sede Subregional en México. (2001). *El terremoto del 13 de enero de 2001 en El Salvador. Impacto Socioeconómico y Ambiental*.
- Comisión Nacional de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres. (s.f.). *Plan Nacional de Contingencia para terremotos*. Protección Civil, El Salvador, San Salvador.
- Dirección General de Estadísticas y Censos. (2007). *Censo de población y vivienda, Población*. San Salvador: DIGESTyC.
- Dirección General de Estadísticas y Censos. (2007). *Materiales de las Paredes según el Techo y Piso*. San Salvador: DIGESTyC.
- Dirección General de Estadísticas y Censos. (2008). *VI Censo de Población y V de vivienda 2007, Cifras Oficiales*. San Salvador: Gobierno de El Salvador.
- Dirección General de Estadísticas y Censos. (2009). *Estimaciones y Proyecciones de Población a Nivel Nacional y Departamental*. Ministerio de Economía, San Salvador.

Federal Emergency Management Agency. (Octubre de 1997). NEHRP Guía para la Rehabilitación Sísmica de edificios. (*Publicación 273*). Washington, D.C., Estados Unidos.

Federal Emergency Management Agency. (03 de Marzo de 2013). *Federal Emergency Management Agency*. Recuperado el 27 de Marzo de 2013, de <http://www.fema.gov/hazus>

FEMA. (Octubre 1997). NEHRP Guía para la Rehabilitación Sísmica de edificios. (*Publicación 273*). Washington, D. C.

Gobierno de El Salvador. (2012). *Ley de Distinciones Honoríficas, Gratificaciones y Títulos* (12a ed.). San Salvador: Editorial LIS.

Gómez Bernal, A., Arellano Méndez, E., Huarte Trujillo, M., Juárez García, H., Cruz Mendoza, E., & Rangel Núñez, J. (2005). Riesgo Sísmico y Escenarios de daño en la Colonia Roma. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*.

Huezo, C. M. (2004). *Sismos en El Salvador 1900 - 2001: Contexto*. San Salvador : Servicio Nacional de Estudios Territoriales.

Hurtado, J. E. (Septiembre de 2000). *Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de desastres*. Recuperado el 17 de Abril de 2012, de http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/redacis/redacis29_p.pdf

Juárez García, H. (2010). *Multi-Hazard Risk Assessment: an Interdependency Approach*. Vancouver: The University of British Columbia.

Llanos López, L. F., & Vidal Gómez, L. M. (2003). Evaluación de vulnerabilidad sísmica de escuelas públicas de Cali: Una propuesta metodológica. Santiago de Cali.

Maldonado Rondón, E. e. (12 de 2007). *redalyc*. Recuperado el 17 de Abril de 2012, de http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/html/496/49611953008/49611953008_1.html

- McGuire, R. K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Boulder, Colorado: Earthquake Engineering Research Institute.
- Meli, R., & Avila, J. (1987). Sismo de San Salvador de 1986. *Instituto Mexicano del Concreto y del Cemento*, 25(193), 31-49.
- Mena Hernández, U. (Julio de 2002). Evaluación del Riesgo Sísmico en zonas urbanas. Barcelona, Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Merlos, R., Ventura, E., de Hasbún, P., Ayala, N., Gutiérrez, M. d., Escobar, C., . . . Guevara Morales, N. (2008). *Informe de resultados de la investigación del sistema constructivo Bloque de concreto con refuerzo integral*. San Salvador.
- Mesa Permanente para la Gestión de Riesgo en El Salvador. (13 de enero de 2011). *Mesa Permanente para la Gestión de Riesgo en El Salvador*. Recuperado el 17 de mayo de 2012, de <http://www.mpgrels salvador.org/>
- Ministerio de Obras Públicas. (1997). *Folleto complementario: "Lineamientos para construcción en Adobe"*. San Salvador: República de El Salvador.
- Ministerio de Obras Públicas. (1997). *Norma Especial para Diseño y Construcción de Viviendas*. San Salvador: República de El Salvador.
- Ministerio de Obras Públicas. (1997). *Norma Técnica para Diseño por Sismo*. San Salvador: República de El Salvador.
- Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano. (2013). *Distribución de Demanda Situación Actual*. Recuperado el Junio de 2013, de <http://www.evivienda.gob.sv/RUI/Reportes/Estadisticas.aspx?IdConsulta=213&IdCriterio=471>
- Ministerio de Turismo. (2013). *El Salvador Turismo*. Recuperado el 24 de febrero de 2013, de <http://www.elsalvadorturismo.com.sv/viajeelsalvador/index.html>

- National Earthquake Hazard Reduction Program. (1994). *NEHRP Handbook for the seismic evaluation of existing buildings*. Federal Emergency Management Agency.
- Office of the United Nations Disaster Relief Co-ordinator. (1980). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis*. Genova.
- Peña López, P. O. (Septiembre de 1997). *Biblioteca Virtual en Salud y Desastres Guatemala*. Recuperado el 02 de Mayo de 2012, de <http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc13008/doc13008.htm>
- Peña, E., López, R. E., & Guevara Morales, N. (2008). *Mejoramiento de la tecnología para la construcción y difusión de la vivienda popular sismo-resistente*. San Salvador.
- Peralta, H. A. (2002). *Escenarios de vulnerabilidad y de daño sísmico de las edificaciones de mampostería de uno y dos pisos en el barrio San Antonio, Cali - Colombia*. Cali, Colombia: Universidad del Valle-Facultad de Ingeniería-Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.
- Rivas Reyes, C. O., & Vásquez Rubio, E. B. (2008). *Estudio de vulnerabilidad sísmica estructural en un sector de la Zona 7, de la Ciudad de Guatemala*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Safina Melone, S. (2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, análisis de su contribución al riesgo sísmico*. Barcelona: Universidad de Cataluña.
- Salas Alvarado, L. A. (2003). *Evaluación del Riesgo Sísmico en residencias del área Metropolitana de San José en función de pérdidas de vidas humanas* (Escuela de Ingeniería Civil ed.). San José: Universidad de Costa Rica.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (s.f.). *Volcanes Activos: Servicio Nacional de Estudios Territoriales*. Recuperado el 17 de Enero de 2013, de www.snet.gob.sv

- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2001). *Servicio Nacional de Estudios Territoriales*. Recuperado el 27 de Febrero de 2013, de Gestión de Riesgos: <http://www.snet.gob.sv/Riesgo/promocion/caso12003.htm>
- Unión Europea. (2003-2006). *Información Sísmica Automática Regional de Daños*. Recuperado el junio de 2013, de http://isard.brgm.fr/encyclopedique.php3?lang=es&id_rubrique=13
- Universidad Nacional Autónoma de México, U., & Servicio Nacional de Estudios Territoriales, S. (2007-2008). *La erupción de 2005 del volcán Ilimatepec (Santa Ana)*. Recuperado el 24 de febrero de 2013, de <http://www.ipgh.org/Simposio-Riesgos-Prevencion/Files/TeresaScolamacchia.pdf>
- Velásquez Vargas. (2006). *Estimación de pérdidas por sismo en edificios peruanos mediante curvas de fragilidad analíticas*. Lima: Pontífica Universidad Católica del Perú .
- Zahran, R. (2009). *Predicción de la capacidad límite última de disipación de energía de estructuras porticadas con vigas planas existentes*. Granada: Universidad de Granada.

Escalas de intensidad

En sismología, **las escalas de intensidad** son una forma de medir o calificar los efectos de un terremoto en diferentes lugares. Este concepto, escala de intensidad, difiere de la **magnitud**, la cual mide la energía liberada por el sismo, como la escala Richter.

La intensidad es por lo tanto, un parámetro no instrumental que evalúa los efectos producidos en un determinado lugar, sobre personas, edificios y el terreno. Es por esto que un sismo tiene un sólo valor de magnitud, pero cómo se sintió el temblor a lo largo de la República Mexicana, por ejemplo, varía dependiendo de la distancia al epicentro y de las características del terreno en cuestión.

Existen dos tipos de intensidades: **intensidad macrosísmica y epicentral**. La Intensidad macrosísmica es la cuantificación de los efectos de un sismo en un lugar en particular. Se realiza a partir de una evaluación estadística de la información disponible de los efectos del sismo sobre la población y las infraestructuras de la zona de estudio.

La intensidad epicentral es la observada en el epicentro del terremoto. Se evalúa a partir de un mapa macrosísmico en el que se anotan todas las intensidades que se han determinado en distintos lugares en función de la información disponible. Generalmente, la intensidad es máxima en el epicentro y decrece a medida que nos alejamos de éste.

Algunas de las escalas de intensidad sísmica utilizadas en diferentes partes del mundo son: Escala Rossi – Forel, Escala de Mercalli Modificada, Escala JMA, Escala MSK, Escala EMS, Escala Geofian, entre otras.

Escala Rossi – Forel

Es la primera escala de intensidad que se propuso y se aplicó en la historia, desarrollada en 1880, cuenta con 10 grados de intensidad, contándose cada uno con números romanos.

ESCALA DE INTENSIDAD SÍSMICA ROSSI - FOREL	
INTENSIDAD	CONCEPTO
I	Microsismo registrado solamente por un sismógrafo, únicamente puede sentirlo un observador experimentado.
II	Movimiento extremadamente débil lo registran diferentes tipos de sismógrafos, sentido por un pequeño grupo de personas que se encuentran en estado de reposo.
III	Movimiento muy débil sensible para varias personas que se encuentran en reposo, y es lo suficientemente fuerte para que la duración sea apreciable.
IV	Movimiento débil lo sienten personas en movimiento, los objetos móviles que no se encuentran sujetos cambian de posición, se agrietan los revestimientos de los techos.
V	Movimiento de intensidad moderada generalmente lo sienten todas las personas, se mueven los muebles grandes y camas, suenan algunas campanas.
VI	Movimiento ligeramente fuerte generalmente las personas que se encuentran dormidas se despiertan; las campanas suenan, oscilación de colgantes, se detienen los relojes de péndulo, es notorio el movimiento de árboles y arbustos, algunas personas salen de sus casas.
VII	Movimiento fuerte los objetos móviles pueden caerse, el acabado de las paredes se cae, suenan las campanas de las iglesias, existe pánico general, sin daño en los edificios.
VIII	Movimiento muy fuerte las chimeneas se caen y se agrietan las paredes de los edificios.
IX	Movimiento extremadamente fuerte algunos edificios pueden colapsar o dañarse parcialmente.
X	Movimiento de intensidad extrema es una catástrofe, solo quedan ruinas, se mueven los estratos del suelo, pueden observarse grietas en la superficie, deslizamiento de rocas de las montañas.

Escala Medvédev-Sponheuer-Kárník

Esta escala es conocida también como MSK o MSK – 64, fue propuesta en 1964 por S.V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik. Es una escala de intensidad macrosísmica usada para evaluar la fuerza de los sismos. Esta se basa en el grado de destrucción que se producen en las estructuras, en el cambio de la topografía del terreno, y el grado de afectación entre la población. Los grados de intensidad son doce en total, siendo el más bajo el número uno, y expresados en números romanos para evitar el uso de decimales.

La escala MSK es muy parecida a la escala Mercalli Modificada (MMI), su escala se enumera a partir del Grado I, en número romanos, hasta el Grado 12 que es la mayor intensidad posible. Se utilizó en Europa como escala oficial hasta que fue sustituida por la escala Macrosísmica Europea.

ESCALA DE INTENSIDAD MSK	
INTENSIDAD	CONCEPTO
I	No es apreciable. La intensidad de las vibraciones esta bajo el nivel del límite de la sensibilidad, solo puede ser detectado por sismógrafos.
II	Escasamente apreciable. Las vibraciones solo la sienten personas individuales en descanso y en casa, especialmente en pisos superiores de edificios.
III	Débil, solo se percibe parcialmente. En los interiores lo perciben algunas personas. En el exterior se percibe solo en circunstancias favorables. Las vibraciones se parecen al paso de un camión pequeño. Algunas personas pueden observar un balanceo de objetos.
IV	Observado fuertemente. El sismo se siente en el interior por mucha gente y en el exterior por algunos. Las personas se despiertan pero no se asustan. Las vibraciones son parecidas al paso de un camión grande. Las ventanas, puertas y platos se sacuden. Los pisos y muros crujen. Los muebles empiezan a moverse. Los objetos que cuelgan se balancean ligeramente. En los autos con motor apagado es posible sentirlo.

ESCALA DE INTENSIDAD MSK	
INTENSIDAD	CONCEPTO
V	Despertarse. El sismo se siente en el interior por todos y en el exterior por muchos. Mucha gente se despierta. Los animales se ponen intranquilos. Los objetos que cuelgan se balancean considerablemente. Los cuadros chocan contra la pared. Los líquidos salpican. La sensación del movimiento es como si cayera un objeto pesado. Los edificios del tipo A, sufren un daño de grado 1. Algunas veces las corrientes cambian de flujo.
VI	Aterrador. Todas las personas lo perciben en los interiores y exteriores. Mucha gente se asusta y sale del edificio. Algunas personas pierden el equilibrio. Los animales huyen de los establos. Algunas veces los platos y cristales se rompen y los libros se caen. Muebles pesados pueden moverse. Los campanarios pueden llegar a sonar. Algunos edificios aislados del tipo B y muchos del tipo A, pueden sufrir daño de grado 1. En algunos casos el grosor de las grietas en el suelo húmedo pueden superar el centímetro.
VII	Daño en edificios. Mucha gente se asusta y sale de los edificios. Mucha gente tiene dificultades para mantenerse en pie. Muchos edificios del tipo C sufren un daño de grado 1, muchos edificios del tipo B sufren un daño de grado 2. Muchos edificios de tipo A sufren un grado de daño 3 y algunos de grado 4. Grietas en los caminos y las tuberías se dañan en las uniones. Grietas en los muros de piedra. Se forman ondas en el agua y se enturbia el agua con la tierra del fondo.
VIII	Destrucción de los edificios. Se produce terror y pánico en toda la gente. Las personas conduciendo un auto, pueden perder el control. Los muebles pesados pueden llegar a caerse. Las lámparas con el balanceo pueden llegar a dañarse. Muchos edificios del tipo C sufren un daño de grado 2, algunos de grado 3. Muchos de los edificios tipo B, sufren daño de grado 3 y muchos del tipo A sufren daño de grado 4. Algunos monumentos se mueven e inclinan. Se producen grietas de varios centímetros en las carreteras. El agua de los lagos se enturbia. En muchos casos cambia el flujo de los ríos.
IX	Daño general en los edificios. Pánico general, considerable daño en los muebles. Los animales huyen desorientados. Muchos edificios del tipo C sufren daño de grado 3 y algunos de grado 4. Muchos de los edificios del tipo B muestran daño de grado 4 y algunos de grado 5. Muchos de los edificios del tipo A sufren daño de grado 5. Los monumentos y las columnas se caen. Se producen daños considerables en las presas. Las tuberías se dañan considerablemente. Las líneas férreas se pueden doblar. El agua se enturbia totalmente, observándose la tierra y fango del fondo de los lagos. Grietas superiores a 10 cm en las carreteras. Se caen rocas y se producen grandes deslizamientos.

ESCALA DE INTENSIDAD MSK	
INTENSIDAD	CONCEPTO
X	Destrucción general de los edificios. Muchos de los edificios del tipo C sufren un daño de grado 4, algunos de grado 5. Muchos edificios del tipo B sufren daño grado 5, la mayoría de los edificios del tipo A, sufren destrucción total. Daño crítico en presas y diques, y daño severo en puentes. Las líneas de los ferrocarriles se doblan. Las líneas enterradas se dañan y rompen. El asfalto y pavimentos muestran ondas. En el terreno, se producen grietas considerables en algunos casos de hasta 1 m. Los deslizamientos son considerables. El agua de los canales, ríos, lagos se agitan hasta mojar la tierra.
XI	Catástrofe Severo daño en edificios bien contruidos, puentes, presas y líneas de ferrocarril, las autopistas pueden quedar inservibles, las tuberías enterradas se destruyen completamente. El terreno cambia considerablemente, con grietas y fisuradas muy grandes.
XII	Cambios en el paisaje. Prácticamente todas las estructuras enterradas y en las superficie se dañan o destruyen. La superficie de la tierra cambia radicalmente. Se observan grietas considerables con extensiones vertical y horizontal. Los ríos pueden llegar a embalsarse, los ríos cambian completamente el curso o trayectoria.

Escala Mercalli Modificada de Intensidad

La escala de Mercalli Modificada de Intensidad (MMI) fue creada en 1902 por Giuseppe Mercalli y reelaborada en 1931 por H. Wood y F. Neumann. Esta escala se usa comúnmente en los Estados Unidos, México y en general en países de América, por sismólogos que buscan información sobre la gravedad de los efectos del terremoto.

Al igual que la escala MSK la puntuación se expresa en número romano, entre el I como mínimo y el XII como extremo superior.

ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA	
INTENSIDAD	CONCEPTO
I	Las personas no sienten el movimiento.
II	Pocas personas pueden notar el movimiento si están en reposo y/o en los pisos superiores de los edificios altos.
III	Muchas personas en los interiores sienten el movimiento. Los objetos colgantes oscilan de un lado a otro. La gente en el exterior no se puede dar cuenta que esta ocurriendo un sismo.
IV	Muchas personas en los interiores sienten el movimiento. Los objetos colgantes se balancean. Los platos, ventanas y puertas se mueven. Poca gente en el exterior puede sentir el movimiento. Los autos estacionados se balancean.
V	Casi toda la gente siente el movimiento. La gente que duerme se despierta. Las puertas se balancean. Los platos se rompen. Los cuadros en las paredes se mueven. Los objetos pequeños se mueven y vuelcan. Los árboles pueden sacudirse. Los líquidos pueden derramarse de los contenedores abiertos.
VI	Todos sienten el movimiento. El dificultoso caminar. Los objetos caen de los estantes. Los cuadros en los muros se caen. Los muebles se mueven. El acabado de las paredes se puede agrietar. Los árboles y los arbustos se sacuden. Los edificios contruidos inadecuadamente pueden dañarse ligeramente. No existe daño estructural.
VII	Es difícil mantenerse en pie. Los conductores sienten que sus automóviles se mueven. Algunos muebles se rompen. Los ladrillos sueltos de los edificios se caen. Los edificios bien contruidos pueden dañarse ligeramente. Los edificios contruidos con deficiencias pueden sufrir daños considerables.
VIII	Los automovilistas tienen problemas para conducir. Las casas que no están bien cimentadas pueden levantarse. Las estructuras altas como son torres o chimeneas se pueden torcer y caer. Los edificios bien contruidos pueden sufrir daños ligeros. Los edificios contruidos inadecuadamente pueden sufrir daño severo. Las ramas de los árboles pueden desgarrarse. Puede haber deslizamientos de tierra si éste se encuentra húmedo. Los niveles de agua de los pozos pueden cambiar.
IX	Los edificios bien contruidos sufren daño considerable. Las casas que no están bien cimentadas se desplazan. Algunas tuberías subterráneas se rompen. El suelo se agrieta. Los embalses sufren daños muy serios.

ESCALA DE INTENSIDAD DE MERCALLI MODIFICADA	
INTENSIDAD	CONCEPTO
X	La mayoría de los edificios y sus cimentaciones se destruyen. Algunos puentes se destruyen. Las presas se dañan seriamente. Ocurren grandes deslizamientos de taludes. El agua salta de las orillas de los cuerpos de agua. El suelo se agrieta en grandes áreas. Las vías de los trenes llegan a doblarse ligeramente.
XI	Muchos edificios colapsan. Algunos de los puentes se destruyen. Aparecen grandes grietas en el suelo. Las tuberías subterráneas se destruyen completamente. Las vías de los trenes se doblan de forma considerable.
XII	Casi todo se destruye. Los objetos son arrojados al aire. El suelo se mueve en forma de ondas o pliegues. Se pueden mover grandes cantidades de rocas.

Escala sísmica de Geofian

Esta escala es similar a la de Mercalli Modificada, sin embargo, ésta incorpora evaluación cuantitativa del movimiento de la tierra adicionalmente a la sensación y la respuesta de las estructuras. También es conocida como la escala de Medvedev, data del año 1953. Es una escala semi-instrumental, sus grados de intensidad dependen del desplazamiento de un oscilador.

ESCALA DE INTENSIDAD SISMICA DE GEOFIAN		
INTENSIDAD	Xo (mm)	CONCEPTO
I	-	Las oscilaciones del terreno se detectan con instrumentos.
II	-	En algunos casos individuales, las personas muy sensibles en descanso lo perciben.
III	-	Algunas personas sienten balanceos.
IV	< 0.5	Es percibido por muchas personas. Las ventanas y las puertas se sacuden.
V	0.5 - 1.0	Los objetos se balancean, los pisos rechinan, vibran los cristales, el yeso exterior se desmorona.
VI	1.1 - 2.0	Los edificios sufren ligeros daños como: grietas delgadas en el yeso, grietas en las baldosas, etc.

ESCALA DE INTENSIDAD SISMICA DE GEOFIAN		
INTENSIDAD	Xo	CONCEPTO
VII	2.1 - 4.0	Los edificios sufren daños considerables como grietas delgadas en el yeso y desprendimiento total de algunas piezas individuales, grietas delgadas en los muros.
VIII	4.1 - 8.0	Destrucción dentro de los edificios, grietas grandes en los muros, caída de cornisas o chimeneas.
IX	8.1 - 16.0	Colapso de algunos edificios, destrucción de muros, azoteas o pisos.
X	16.1 - 32.0	colapso de muchos edificios, fisuras en el terreno con aberturas de hasta un metro.
XI	> 32.0	Numerosas fisuras en la superficie de la tierra y grandes deslizamientos en las montañas
XII	-	Grandes cambios en el paisaje

Como se ha descrito, en los métodos de medición, la calificación de la intensidad de los efectos de un sismo no requiere mediciones instrumentales. Así los sismólogos pueden utilizar registros históricos y referencias para hacer valoraciones de la intensidad de eventos anteriores. Esta investigación, de intensidades, ayuda a promover la comprensión de la historia del terremoto de una región, y estimar los riesgos futuros.

Estadísticas de Vivienda en El Salvador

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
SAN SALVADOR	466,718	67,976	42,173	80,150	240,790	2,824	611	29,407	2,787
Aguilares	5,730	918	334	1,401	2,490	41	16	493	37
Apopa	39,032	5,290	1,771	9,381	20,039	262	31	2,010	248
Ayutuxtepeque	10,335	1,541	777	1,342	5,915	28	23	696	13
Cuscatancingo	33,937	4,411	1,190	7,932	16,868	304	104	2,839	289
Delgado	19,537	2,704	758	2,757	12,444	89	12	652	121
El Paisnal	3,860	580	62	1,376	990	41	13	727	71
Guazapa	6,236	1,024	182	1,745	2,082	82	15	1,062	44
Ilopango	31,768	4,591	2,215	4,390	18,696	155	14	1,603	104
Mejicanos	42,200	4,969	5,059	6,535	23,719	270	34	1,464	150
Nejapa	8,458	1,288	661	2,343	2,027	151	31	1,909	48
Panchimalco	8,893	928	328	2,128	1,821	70	55	3,444	119
Rosario de Mora	2,705	375	111	527	528	10	21	1,129	4
San Marcos	16,301	1,708	1,278	2,988	8,850	114	26	1,137	200
San Martín	21,687	4,084	2,735	4,784	7,720	92	33	1,995	244
San Salvador	100,815	15,847	16,205	14,577	50,112	598	81	2,723	672
Santiago Texacuangos	4,972	538	136	1,558	1,835	21	22	836	26
Santo Tomas	6,494	775	216	1,749	2,483	52	24	1,156	39
Soyapango	72,923	9,860	3,922	7,677	49,266	332	27	1,510	329
Tonacatepeque	30,835	6,545	4,233	4,960	12,905	112	29	2,022	29

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VIVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
CHALATENANGO	56,483	12,448	2,046	13,334	15,924	499	264	11,617	351
Agua Caliente	2,406	530	157	732	516	15	4	447	5
Arcatao	833	195	5	91	261	14	9	257	1
Azacualpa	371	93	12	69	148	15	1	33	
Cancasque	464	87	2	42	64	6	5	256	2
Chalatenango	8,737	1,783	488	2,115	3,478	67	9	776	21
Citalá	1,188	279	55	189	322	8	3	332	
Comalapa	874	187	15	194	166	9	3	203	97
Concepción Quezaltepeque	2,061	509	56	495	623	25	11	335	7
Dulce Nombre de Maria	1,476	358	55	317	394	10	8	329	5
El Carrizal	805	247	13	284	110	6	3	142	
El Paraíso	3,188	707	93	1,025	753	22	15	556	17
La Laguna	1,163	269	28	284	177	33	6	366	
La Palma	3,399	882	139	611	773	29	39	919	7
La Reina	2,684	520	55	626	859	21	13	538	52
Las Flores	444	74	5	160	125	5	1	70	4
Las Vueltas	293	61	11	83	59	1		78	
Nombre de Jesús	1,177	216	76	237	306	26	9	306	1
Nueva Concepción	8,145	1,606	342	1,981	2,523	51	33	1,558	51
Nueva Trinidad	419	59	3	102	126	7	4	116	2
Ojos de Agua	1,134	242	28	255	216	16	9	366	2
Potonico	509	91	1	192	92	13	2	118	
San Antonio de la Cruz	447	78	19	92	61	4	9	184	
San Antonio los Ranchos	464	92	7	129	98	1	4	133	
San Fernando	689	163	5	71	78	10	7	355	
San Francisco Lempa	324	96	6	69	116	10		27	

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
CHALATENANGO	56,483	12,448	2,046	13,334	15,924	499	264	11,617	351
San Francisco Morazán	1,087	264	4	207	158	2	10	431	11
San Ignacio	2,340	519	147	419	394	11	9	827	14
San Isidro Labrador	735	155	7	184	235	4	4	145	1
San Luís del Carmen	532	187	6	99	113	12	2	98	15
San Miguel de Mercedes	682	106	12	207	203	6	4	131	13
San Rafael	1,433	416	42	279	433	7	2	251	3
Santa Rita	2,036	538	43	599	590	6	1	256	3
Tejutla	3,944	839	109	895	1,354	27	25	678	17

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
05-LA LIBERTAD	195,211	37,586	22,498	40,685	63,446	1,308	608	27,990	1,090
Antiguo Cuscatlán	10,413	1,411	3,972	972	3,432	49	9	486	82
Chiltiupán	2,687	520	10	387	444	16	27	1,260	23
Ciudad Arce	17,554	3,282	594	5,021	5,435	167	64	2,879	112
Colón	30,307	6,688	4,136	5,821	11,603	118	33	1,860	48
Comasagua	2,925	402	26	1,070	489	9	17	912	
Huizucar	3,629	536	84	1,027	431	35	34	1,468	14
Jayaque	2,970	467	52	592	1,094	31	21	701	12
Jicalápa	1,249	189	6	185	233	15	7	595	19
La Libertad	10,598	2,359	282	3,381	2,402	103	32	1,989	50
Nuevo Cuscatlán	1,540	124	130	503	564	20	4	195	
Quezaltepeque	3,528	514	77	908	1,276	28	5	663	57
Sacacoyo	3,860	630	270	888	991	12	32	982	55
San José Villanueva	25,510	8,097	2,116	5,885	5,612	191	74	3,471	64

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
05-LA LIBERTAD	195,211	37,586	22,498	40,685	63,446	1,308	608	27,990	1,090
San Juan Opico	15,850	3,199	1,108	2,831	6,160	135	49	2,138	230
San Matías	2,018	323	45	839	447	16	4	311	33
San Pablo Tacachico	5,424	928	133	1,111	1,565	72	29	1,516	70
Santa Tecla	35,982	4,601	8,738	4,533	16,186	159	53	1,583	129
Talnique	2,171	264	33	560	655	41	11	599	8
Tamanique	3,707	818	87	890	841	35	18	1,012	6
Teotepeque	3,152	589	45	528	403	11	45	1,526	5
Tepecoyo	3,675	491	49	1,086	851	26	18	1,127	27
Zaragoza	6,462	1,154	505	1,667	2,332	19	22	717	46

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
07-CUSCATLÁN	58,834	8,297	1,698	17,634	15,403	410	279	14,796	317
Candelaria	2,351	180	45	833	610	8	6	669	
Cojutepeque	12,934	1,633	672	2,431	5,941	58	35	2,063	101
El Carmen	3,027	282	37	1,301	314	38	26	1,029	
El Rosario	1,082	175	18	337	147	3	3	399	
Monte San Juan	2,227	240	21	588	197	40	14	1,089	38
Oratorio de Concepción	1,024	246	9	371	155	2	1	240	
San Bartolomé Perulapía	2,178	321	77	687	611	19	5	456	2
San Cristóbal	1,756	151	6	741	237	18	6	594	3
San José Guayabal	2,599	489	70	880	442	17	15	677	9
San Pedro Perulapán	11,192	1,489	258	3,488	2,304	61	90	3,495	7

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
San Rafael Cedros	4,154	520	274	1,473	1,224	12	9	638	4
San Ramón	1,561	198	30	699	260	3	3	359	9
Santa Cruz Analquito	728	94	15	359	148	7	1	104	
Santa Cruz Michapa	3,035	403	63	695	909	20	25	902	18
Suchitoto	6,854	1,284	77	2,108	1,513	96	32	1,667	77
Tenancingo	2,132	592	26	643	391	8	8	415	49

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
08-LA PAZ	91,622	18,550	2,755	25,928	24,582	650	285	17,728	1,144
Cuyultitán	1,706	340	35	517	544	7	1	230	32
El Rosario	5,724	1,472	137	1,662	1,784	18	14	582	55
Jerusalén	782	141	24	256	220	1	4	136	
Mercedes la Ceiba	234	52	14	118	16	3	1	30	
Olocuilta	8,538	1,420	599	2,222	2,794	15	12	1,215	261
Paraíso de Osorio	807	133	20	285	162	43	2	162	
San Antonio Masahuat	1,125	156	18	430	254	7	7	251	2
San Emigdio	693	96	18	303	138	1	5	131	1
San Francisco Chinameca	1,831	298	24	457	271	8	10	755	8
San Juan Nonualco	5,238	1,054	71	1,162	1,977	29	15	890	40
San Juan Talpa	2,271	419	80	730	669	28	10	318	17
San Juan Tepezontes	1,052	164	14	395	266	2	1	208	2
San Luís La Herradura	6,951	1,633	200	1,924	1,430	70	27	1,619	48
San Luís Talpa	6,934	1,912	171	1,380	1,152	45	41	2,169	64
San Miguel Tepezontes	1,339	164	28	335	342	4	6	353	107
San Pedro Masahuat	8,554	2,051	195	3,415	1,353	116	22	1,249	153

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
San Pedro Nonualco	2,449	411	18	902	497	25	13	582	1
San Rafael Obrajuelo	2,635	419	106	659	1,101	19	6	303	22
Santa Maria Ostuma	1,736	356	39	572	379	28	11	341	10
Santiago Nonualco	10,606	1,748	198	3,630	2,516	53	40	2,356	65
Tapalhuaca	1,336	317	17	358	239	19	1	184	201
Zacatecoluca	19,081	3,794	729	4,216	6,478	109	36	3,664	55

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
09-CABAÑAS	37,697	7,133	2,764	8,290	8,631	455	192	10,075	157
Cinquera	455	112	7	109	91		2	133	1
Dolores	1,538	240	114	200	251	39	12	681	1
Guacotecti	1,565	426	186	331	234	10	5	354	19
Ilobasco	14,906	2,766	1,116	3,690	3,760	188	54	3,273	59
Jutiapa	1,659	348	50	494	183	22	4	553	5
San Isidro	2,348	563	91	448	605	27	19	573	22
Sensuntepeque	10,242	1,844	900	1,721	2,690	112	59	2,905	11
Tejutepeque	1,961	353	152	534	382	26	6	496	12
Victoria	3,023	481	148	763	435	31	31	1,107	27

DEPARTAMENTOS Y MUNICIPIOS	TOTAL VVIENDAS	NA	CERAMICA	LOSA DE CEMENTO	LADRILLO DE CEMENTO	LADRILLO DE BARRO	MADERA	TIERRA	OTRO
SAN VICENTE	45,159	8,207	1,864	11,677	13,090	402	217	9,400	302
Apastepeque	5,061	966	191	1,159	1,010	62	43	1,609	21
Guadalupe	1,403	198	39	547	359	9	1	250	
San Cayetano Istepeque	1,460	245	55	598	311	8	5	237	1
San Esteban Catarina	1,579	283	54	417	447		3	375	
San Ildefonso	2,293	521	91	587	350	32	11	696	5
San Lorenzo	1,772	361	41	387	671	6	6	272	28
San Sebastián	3,961	694	264	1,032	1,171	34	8	747	11
San Vicente	13,685	1,983	813	2,718	5,716	113	54	2,118	170
Santa Clara	1,562	318	39	464	242	41	6	452	
Santo Domingo	1,858	337	73	602	431	9	11	392	3
Tecoluca	7,776	1,886	130	2,372	1,494	62	57	1,726	49
Tepetitán	999	147	38	295	265	8	4	242	
Verapaz	1,750	268	36	499	623	18	8	284	14

Clasificación de los poblados

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
CHALATENANGO	192,788	64,148	128,640	
Agua Caliente	8,261	1,984	6,277	pueblo
Arcatao	2,946	949	1,997	cantón
Azacualpa	1,136	527	609	cantón
Cancasque	1,751	668	1,083	cantón
Chalatenango	29,271	16,976	12,295	pueblo
Citalá	4,164	1,368	2,796	cantón
Comalapa	2,996	786	2,210	cantón
Concepción Quezaltepeque	6,457	2,998	3,459	cantón
Dulce Nombre de Maria	5,051	2,105	2,946	cantón
El Carrizal	2,464	369	2,095	cantón
El Paraíso	10,483	2,851	7,632	pueblo
La Laguna	3,923	433	3,490	canton
La Palma	12,235	2,918	9,317	pueblo
La Reina	9,525	2,036	7,489	canton
Las Flores	1,583	585	998	canton
Las Vueltas	940	301	639	canton
Nombre de Jesús	4,484	817	3,667	canton
Nueva Concepción	28,625	9,845	18,780	pueblo
Nueva Trinidad	1,673	221	1,452	canton
Ojos de Agua	3,667	800	2,867	canton
Potonico	1,586	767	819	canton
San Antonio de la Cruz	1,854	129	1,725	canton
San Antonio los Ranchos	1,619	618	1,001	canton
San Fernando	2,593	631	1,962	canton
San Francisco Lempa	862	598	264	canton
San Francisco Morazán	3,919	704	3,215	canton
San Ignacio	8,611	1,233	7,378	canton
San Isidro Labrador	2,592	1,134	1,458	canton
San Luís del Carmen	1,173	275	898	canton
San Miguel de Mercedes	2,487	1,027	1,460	canton
San Rafael	4,264	1,666	2,598	canton
Santa Rita	5,985	400	5,585	canton
Tejutla	13,608	5,429	8,179	pueblo

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
LA LIBERTAD	660,652	463,215	197,437	
Antiguo Cuscatlán	33,698	33,698	0	pueblo
Chiltiupán	10,897	777	10,120	pueblo
Ciudad Arce	60,314	41,483	18,831	ciudad pequeña
Colón	96,989	91,212	5,777	ciudad pequeña
Comasagua	11,870	2,872	8,998	pueblo
Huizucar	14,465	4,841	9,624	pueblo
Jayaque	11,058	6,894	4,164	pueblo
Jicalápa	5,116	420	4,696	canton
La Libertad	35,997	23,103	12,894	pueblo
Nuevo Cuscatlán	6,897	4,075	2,822	canton
Quezaltepeque	52,643	36,162	16,481	ciudad pequeña
Sacacoyo	12,299	9,872	2,427	pueblo
San José Villanueva	13,576	10,737	2,839	pueblo
San Juan Opico	74,280	44,986	29,294	ciudad pequeña
San Matías	7,314	1,167	6,147	canton
San Pablo Tacachico	20,366	5,619	14,747	pueblo
Santa Tecla	121,908	108,840	13,068	ciudad grande
Talnique	8,254	4,889	3,365	canton
Tamanique	13,544	3,957	9,587	pueblo
Teotepeque	12,320	1,283	11,037	pueblo
Tepecoyo	14,322	8,293	6,029	pueblo
Zaragoza	22,525	18,035	4,490	pueblo

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
SAN SALVADOR	1,567,156	1,462,999	104,157	
Aguilares	21,267	19,134	2,133	pueblo
Apopa	131,286	131,286	0	ciudad grande
Ayutuxtepeque	34,710	34,710	0	pueblo
Cuscatancingo	66,400	66,400	0	ciudad pequeña
Delgado	120,200	112,161	8,039	ciudad grande
El Paisnal	14,551	6,723	7,828	pueblo
Guazapa	22,906	14,227	8,679	pueblo
Ilopango	103,862	103,862	0	ciudad grande
Mejicanos	140,751	140,751	0	ciudad grande
Nejapa	29,458	16,530	12,928	pueblo
Panchimalco	41,260	16,164	25,096	pueblo
Rosario de Mora	11,377	5,053	6,324	pueblo
San Marcos	63,209	63,209	0	ciudad pequeña

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
SAN SALVADOR	1,567,156	1,462,999	104,157	
San Martín	72,758	66,004	6,754	ciudad pequeña
San Salvador	316,090	316,090	0	ciudad grande
Santiago Texacuangos	19,428	12,382	7,046	pueblo
Santo Tomas	25,344	18,752	6,592	pueblo
Soyapango	241,403	241,403	0	ciudad grande
Tonacatepeque	90,896	78,158	12,738	ciudad pequeña

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
CUSCATLÁN	231,480	96,692	134,788	
Candelaria	10,090	3,598	6,492	pueblo
Cojutepeque	50,315	41,072	9,243	ciudad pequeña
El Carmen	13,345	2,075	11,270	pueblo
El Rosario	4,220	425	3,795	canton
Monte San Juan	10,224	1,606	8,618	pueblo
Oratorio de Concepción	3,578	859	2,719	canton
San Bartolomé Perulapía	8,058	4,682	3,376	canton
San Cristóbal	8,316	865	7,451	canton
San José Guayabal	9,300	2,871	6,429	canton
San Pedro Perulapán	44,730	14,988	29,742	pueblo
San Rafael Cedros	17,069	5,356	11,713	pueblo
San Ramón	6,292	1,261	5,031	canton
Santa Cruz Analquito	2,585	1,807	778	canton
Santa Cruz Michapa	11,790	6,659	5,131	pueblo
Suchitoto	24,786	7,654	17,132	pueblo
Tenancingo	6,782	914	5,868	canton

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
LA PAZ	308,087	152,207	155,880	
Cuyultitán	5,590	3,365	2,225	canton
El Rosario	16,784	9,374	7,410	pueblo
Jerusalén	2,570	448	2,122	canton
Mercedes la Ceiba	637	485	152	canton
Olocuilta	29,529	15,917	13,612	pueblo
Paraíso de Osorio	2,727	1,751	976	canton
San Antonio Masahuat	4,258	1,101	3,157	canton
San Emigdio	2,818	1,373	1,445	canton
San Francisco Chinameca	7,387	2,659	4,728	canton

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
LA PAZ	308,087	152,207	155,880	
San Juan Nonualco	17,256	7,600	9,656	pueblo
San Juan Talpa	7,707	4,536	3,171	canton
San Juan Tepezontes	3,630	1,320	2,310	canton
San Luís La Herradura	20,405	8,719	11,686	pueblo
San Luís Talpa	21,675	13,218	8,457	pueblo
San Miguel Tepezontes	5,084	2,567	2,517	canton
San Pedro Masahuat	25,446	13,116	12,330	pueblo
San Pedro Nonualco	9,252	3,119	6,133	canton
San Rafael Obrajuelo	9,820	5,112	4,708	canton
Santa Maria Ostuma	5,990	1,552	4,438	canton
Santiago Nonualco	39,887	12,013	27,874	pueblo
Tapalhuaca	3,809	735	3,074	canton
Zacatecoluca	65,826	42,127	23,699	pueblo

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
CABAÑAS	149,326	49,694	99,632	
Cinquera	1,467	454	1,013	canton
Dolores	6,347	1,413	4,934	canton
Guacotecti	5,550	2,419	3,131	canton
Ilobasco	61,510	23,778	37,732	ciudad pequeña
Jutiapa	6,584	627	5,957	canton
San Isidro	7,796	1,551	6,245	canton
Sensuntepeque	40,332	15,395	24,937	pueblo
Tejutepeque	7,114	2,745	4,369	canton
Victoria	12,626	1,312	11,314	pueblo

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
SAN VICENTE	161,645	78,157	83,488	
Apastepeque	18,342	4,859	13,483	pueblo
Guadalupe	5,486	3,721	1,765	canton
San Cayetano Istepeque	5,103	1,610	3,493	canton
San Esteban Catarina	5,661	2,527	3,134	canton
San Ildefonso	7,799	2,182	5,617	canton
San Lorenzo	6,055	2,061	3,994	canton
San Sebastián	14,411	6,553	7,858	pueblo
San Vicente	53,213	36,700	16,513	ciudad pequeña
Santa Clara	5,349	947	4,402	canton

Departamento	Total	Urbano	Rural	Clasificación
SAN VICENTE	161,645	78,157	83,488	
Santo Domingo	6,445	2,221	4,224	cantón
Tecoluca	23,893	10,476	13,417	pueblo
Tepetitán	3,631	1,845	1,786	canton
Verapaz	6,257	2,455	3,802	canton

Conversión de Aceleración Pico del Terreno a Escala de Mercalli Modificada

Existe una conversión entre los parámetros sísmicos, en este caso, entre la escala Mercalli Modificada(MMI) y la Aceleración Pico del Terreno (PGA), como se muestra en la siguiente tabla:

Mercalli Modificada	Términos descriptivos	Aceleración (%g)
I	Imperceptible	<0.1
II	Muy suave	0.1-0.2
III	Suave	0.2-0.5
IV	Moderado	0.5-1.0
V	Poco fuerte	1.0-2.0
VI	Fuerte	2.0-5.0
VII	Muy fuerte	5.0-10.0
VIII	Destruyivo	10.0-20.0
IX	Devastados	20.0-50.0
X	Aniquilados	50.0-100.0 (1g)
XI	Desastre	1-2g
XII	Desastre mayor	>2g